

VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

Fakulta strojní

Katedra energetiky

Koncepcia jadrovej elektrárne tlakovodného typu

The Conception of Pressurised Water Reactor

Študent:

Petričko Lukáš

Vedúci bakalárskej práce:

Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Ostrava 2010

## Zadání bakalářské práce

Student: **Lukáš Petričko**  
Studijní program: **B2341 Strojirenství**  
Studijní obor: **3907R004 Provoz a řízení v energetice**  
Téma: **Koncepce jaderné elektrárny tlakovodního typu.  
The Conception of Pressurised Water Reactor.**

### Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte a předložte formou rešerše literatury souhrn informací o koncepci jaderných elektráren tlakovodního typu.
  2. Navrhněte ideové řešení tepelného okruhu a popište základní konstrukční části. Uveďte základní teoretický rozbor účinnosti jaderné elektrárny.
- Grafická část bude obsahovat:
1. Schémata tepelných okruhů.
  2. Grafické výstupy experimentů a testů.

### Seznam doporučené odborné literatury:

- [ 1 ] RÉDR, M., PŘÍHODA, M. *Základy tepelné techniky*. Praha. SNTL, 1991, ISBN 80-03-00366-0
- [ 2 ] SADIK KAKAC. *Boilers, evaporators, condensers*. John Wiley. USA. New York 1991  
CIP 90-22486 v knihovně VŠB.
- [ 3 ] HEJZLAR, R. *Stroje a zařízení jaderných elektráren*. ČVUT v Praze. 2005. 211 stran. ISBN 80-01-03189-6.
- [ 4 ] Simulační program jaderné elektrárny Temelín-primární okruh. ČEZ Praha, 2002.
- [ 5 ] J. BEČVÁŘ a kol. *Jaderné elektrárny*. SNTL Praha, 1989. Celostátní vysokoškolská učebnice.
- [ 6 ] F. DUBŠEK. *Jaderná energetika*. PC-DIR Brno, 1994, ISBN 80-214-0833-2.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.**

Datum zadání: 18.12.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010

  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.  
vedoucí katedry



  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Radim Farana, CSc.  
děkan fakulty

Jméno LUKÁŠ PETRÍČKO  
Den, měsíc, rok narození 19.6.1988  
Rodné číslo 880619/9798  
Adresa VÝŠNÝ MIROŠOV 49  
E-mail tevtates@seznam.cz

Ročník 3  
Stud. obor PROVOZ A ŘÍZENÍ V ENERGETICE  
Stud. skupina SBSPEN 01  
Ev. č. PET 535

## ŽÁDOST

Žádost o písemné Diplom. práce v Slovenském jazyku

### Odůvodnění žádosti:

Těmito bych Vám chtěl požádat o písemní diplomovou práci v slovenském jazyku z důvodu nevedení správné české gramatiky. Českou gramatiku neovládám, tím pádem by diplomová práce mohla být nedostatečná.

Za odobření předem děkuji

*Lukáš Petříčko*

23.11.2009

datum

*Petríčko*

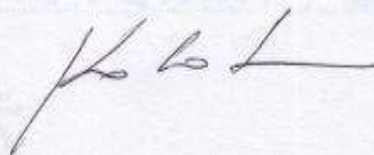
podpis studenta



Vyjádření katedry:

Souhlasím

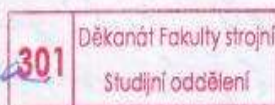
1.4.2010



Rozhodnutí děkana:

- 2 - 12 - 2009

Souhlasím



Rozhodnutí rektora:

## PREHLÁSENIE ŠTUDENTA

Prehlasujem, že som celú bakalársku prácu, v rámci príloh vypracoval samostatne a uviedol som všetky použité podklady a literatúru.

V Ostrave.....19.5.2010

Podpis.....*Lukáš Křiváček*

## PodĎakovanie

Touto cestou si dovoľujem poďakovať sa vedúcemu bakalárskej práce prof. Ing. Pavlu Kolatovi, DrSc. za odbornú pomoc a cenné rady, ktoré mi poskytol pri jej vypracovaní.

Prehlasujem, že:

- bol som zoznamovaný s tým, že na moju bakalársku prácu sa plne vzťahuje zákon č. 121/2000 Sb. – autorský zákon, hlavne §35 – užitie diela v rámci občianskych a náboženských obradov, v rámci školných predstavení a užitie diela školného a §60 – školské dielo.
- beriem na vedomie, že Vysoká škola bánska – Technická univerzita Ostrava (ďalej len VŠB-TUO) má právo nezárobkovo k svojej vnútornej potrebe bakalársku prácu použiť (§35 odst.3).
- súhlasím s tým, že jeden výtlačok bakalárskej práce bude uložený v Ústrednej knižnici VŠB-TUO k prezenčnému nahliadnutiu a jeden výtlačok bude uložený u vedúceho diplomovej (bakalárskej) práce. Súhlasím s tým, že údaje o bakalárskej práci budú zverejnené v informačnom systéme VŠB-TUO.
- bolo zjednané, že s VŠB-TUO, v prípade záujmu z inej strany, uzavrú licenčnú zmluvu s oprávnením použiť dielo v rozsahu §12 odst.4 autorského zákona.
- bolo zjednané, že užiť svoje dielo – bakalársku prácu alebo poskytnutie licencie k jej použitiu môžem len so súhlasom VŠB-TUO, ktorá je oprávnená v takomto prípade odo mňa požadovať primeraný príspevok na úhradu nákladov, ktoré boli VŠB-TUO na vytvorenie diela vynaložené (až do ich skutočnej výšky).
- beriem na vedomie, že odovzdaním svojej práce súhlasím so zverejnením svojej práce podľa zákona č 111/1998., o vysokých školách a o zmene a doplnení ďalších zákonov (zákon o vysokých školách), v znení neskorších predpisov, bez ohľadu na výsledok jej obhajoby.

V Ostrave: 19.5.2010

Lukáš Petrucha

Adresa trvalého pobytu:

Vyšný Mirošov 89, 090 11 Vyšný Orlík, Svidník

## **ANOTÁCIA BAKALÁRSKEJ PRÁCE**

PETRIČKO, L. Konceptia jadrovej elektrárne tlakovodného typu.

Ostrava: katedra energetiky, Fakulta strojní VŠB – Technická univerzita Ostrava 2010,  
53 s. Bakalárska práca, vedúci: Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc.

Táto bakalárska práca sa zaoberá koncepciou jadrových elektrární tlakovodného typu, pričom prvá časť práce ponúka ucelený prehľad o tlakovodných jadrových elektrárnach, ich koncepcie a porovnanie. Druhá časť práce obsahuje náčrt primárneho a sekundárneho okruhu jadrovej elektrárne, ich jednotlivé časti, schémy a princíp činnosti.

V poslednej časti tejto práce je návrh ideového riešenia tepelného okruhu, kde účelom výpočtu je určenie jednotlivých parametrov sekundárneho okruhu elektrárne VVER 440. Následne je prevedený aj výpočet účinnosti navrhutej jadrovej elektrárne a uvedené možnosti jej zvyšovania.

## **ANNOTATION OF BACHELOR WORK**

PETRIČKO, L. The Conception of Pressurized Water Reactor

Ostrava: Department of energy engineering, Faculty of mechanical engineering, VŠB – Technical University Ostrava, 2010, 53 pages, Bachelor work, head: Prof. Ing. Pavel Kolat, DrSc

This bachelor work is focused on conception of pressurized water reactor where in the first chapter you can find a general overview about the pressurized water reactor, their conceptions and comparison. Second chapter of thesis contains an outline of primary and secondary field of nuclear power house, their different parts, schemas and principle of activities. The last chapter of this work presents an ideal solution of thermal circuit where purpose of calculation is determination of individual parameters of secondary field in power house VVER 440. Also an additional calculations of proposed power house effectivity have been made and options of its increasing is listed.

# Obsah

Zoznam použitých symbolov, označení a skratiek .....	10
1. Úvod .....	12
2. História .....	13
3. Súčasnosť .....	14
4. Princíp a bezpečnosť .....	15
4.1 Princíp .....	15
4.2 Bezpečnosť .....	15
5. Rozdelenie .....	17
6. Vývoj jadrovej energetiky .....	19
6.1 Vývoj jadrových elektrární tlakovodného typu .....	20
6.1.1 VVER 440 .....	20
6.1.2 VVER 1000 .....	21
6.1.3 EPR III+ .....	22
6.1.4 VVER III+ .....	24
6.1.5 AP 600 III+, 1000 III+ Westinghouse .....	26
6.1.6 SCWR .....	27
7. Porovnanie .....	30
8. Primárny okruh jadrovej elektrárne .....	31
8.1 Jadrový reaktor .....	32
8.2 Parogenerátor .....	32
8.3 Hlavné cirkulačné čerpadlo .....	32
8.4 Kompenzátor objemu .....	33
8.5 Primárne potrubie .....	33
9. Sekundárny okruh jadrovej elektrárne .....	34
9.1 Parná turbína, generátor .....	34
9.2 Kondenzátor .....	35



9.3	Nízkotlakové a vysokotlakové regeneračné ohrievače .....	36
9.4	Kondenzačné a napájacie čerpadla .....	36
9.5	Obehové čerpadla .....	36
10.	Výpočet parametrov sekundárneho okruhu elektrárne .....	37
10.1	Výpočet expanzie pary v turbíne .....	38
10.2	Výpočet ohrievania napájacej vody .....	42
10.3	Výpočet účinnosti navrhutej elektrárne .....	48
10.3.1	Možnosti zvyšovania účinnosti.....	49
11.	Záver .....	51
12.	Použitá literatúra .....	52
13.	Prílohy.....	53

## Zoznam použitých symbolov, označení a skratiek

$i$	entalpia	$[kJ.kg^{-1}]$
$i_{an}$	merná entalpia na vstupe n-tého dielu turbíny ( $n = 1,2$ )	$[kJ.kg^{-1}]$
$i_{en}$	merná entalpia na výstupe n-tého dielu turbíny ( $n = 1,2$ )	$[kJ.kg^{-1}]$
$i_n$	merná entalpia vody za n-tým ohrievačom napájacej vody ( $n = 1,2,...,6$ )	$[kJ.kg^{-1}]$
$i_{on}$	merná entalpia odberovej páry ( $n = 1,2,...,6$ )	$[kJ.kg^{-1}]$
$i_n^*$	merná entalpia odpovedajúceho tlaku sýtosti kondenzujúcej páry	$[kJ.kg^{-1}]$
$P$	výkon	$[MW]$
$P_E$	výkon elektrárne na svorkách elektrického generátora	$[MW]$
$P_{CV}$	vlastná spotreba elektrárne	$[MW]$
$P_G$	výkon párneho generátora	$[MW]$
$p$	tlak	$[MPa]$
$p_{pg}$	tlak sýtej pary v parnom generátore	$[MPa]$
$p_{e1}$	tlak za stredotlakovým dielom turbíny	$[MPa]$
$p_{on}$	odberový tlak ( $n = 1,2,...,6$ )	$[MPa]$
$Q_{mP}$	množstvo vyrobenej páry	$[kg.s^{-1}]$
$t$	teplota	$[^{\circ}C]$
$t_{vn}$	teplota za n-tým ohrievačom napájacej vody ( $n = 1,2,...,6$ )	$[^{\circ}C]$
$t_{sn}$	teplota sýtosti odpovedajúca tlaku odberovej páry ( $n = 1,2,...,6$ )	$[^{\circ}C]$
$T_s^x$	stredná teplota chladiva v parnom generátore	$[K]$
$x$	suchosť	$[1]$
$x_n$	relatívne množstvo odberovej páry ( $n = 1,2,...,6$ )	$[1]$
$y_n$	relatívne množstvo kondenzátu ( $n = 1, 2, 3$ )	$[1]$
$\eta$	účinnosť	$[1]$
$\eta_{me}$	mechanická a elektrická účinnosť turbogenerátoru	$[1]$
$\eta_{te}$	tepelná účinnosť párneho obehu vzhľadom na svorky ele. generátoru	$[1]$
$\eta_{ti}$	vnútorná tepelná účinnosť párneho cyklu	$[1]$
$\varphi_{CV}$	relatívna vlastná spotreba elektrárne	$[1]$

## Dolný index

NV	napájacia voda
pg	párny generátor
o	odberový
ST	stredotlakový diel turbíny
NT	nízkotlakový diel turbíny

## Skratky

ABB	Fúzia spoločnosti Brown Boveri a ASEA-Atom
AGR	Advanced Gas Cooled
AP1000	Advanced Pressurized Water Reactor 1000 MWe
BWR	Boiling Water Reactor
CANDU	Canada Deuterium Uranium, Reactor
EPR	European Pressurized Water Reactor
FBR	Fast Breeder Reactor
GCR	Gas Cooled Reactor
GWd/t	GigaWatt deň na tonu
HTGR	High Temperature Gas-Cooled Reactor
IAEA	International Atomic Energy Agency
JE	jadrová elektrárň
LWR	Light Water Reactor
MOX	(U,Pu)O <sub>2</sub> Mixed-Oxide Fuel
MWe	Megawatt elektrický
MWt	Megawatt tepelný
NPI	Nuclear Power International
PWR	Pressurized-Water Reactor
SCWR	Supercritical Water-Cooled Reactor System
VVER	Vodo -Vodjanoj Energetičeskij Reaktor

# 1. Úvod

Predpokladá sa, že globálna potreba zdrojov elektriny sa behom ďalších 30 rokov zdvojnásobí. Situácia je taká, že veľká časť, ak nie všetka ľudská činnosť uvoľňuje do ovzdušia  $\text{CO}_2$ . Zodpovednosť za väčšinu tohto uvoľňovania má na svedomí doprava, priemysel a energetika.

Zdroje uhlia a uránu sú vo svojej podstate rovnomerne rozložené po celej planéte. Ropa ako nerastná surovina s významnou ekonomickou hodnotou a jej neustále vzrastajúca cena, ktorá je spôsobená kombináciou viacerých faktorov (končiace zásoby, vzrastajúci dopyt, špekulácie na burzách, celosvetová kríza) je momentálne síce ešte stále v popredí, avšak za kontrolou svetových zásob stojí Saudská Arábia z 20%. Pre EÚ nepredstavuje veľmi stabilného a predvídateľného partnera. Podobná situácia je aj zo zásobami zemného plynu. Je nutné podotknúť, že za pomoci pokročilých metód prieskumu sú objavované stále nové náleziska, samozrejme tento fakt situáciu nemení.

V podstate najmladší, ale rýchlo sa rozvíjajúci zdroj do ktorého sa vkladajú veľké nádeje je jadrová energia. Jadrová energia sa v súčasnej dobe najvýznamnejšie využíva pri výrobe elektrickej energie, v doprave (ponorky, lietadlové lode), výskume a v kozmickej technike. Aj napriek mnohým výhodám jadrovej energetiky ako napr. neprispievanie ku globálnemu otepľovaniu za pomoci  $\text{CO}_2$ , efektívnosť, šetrenie životného prostredia, ekonomické hľadisko má tento „renesančný“ smer mnoho odporcov a to vďaka spojitosti s jadrovými zbraňami, bezpečnosťou jadrových reaktorov, rádioaktívny odpad v neposlednom rade nevedomosť.

Je treba si uvedomiť, že všetky zdroje energie majú isté riziká. Taktiež je potrebné hľadiť na problém objektívne a hľadať nové riešenia, alternatívy, ktoré nás posunú opäť o krok ďalej.

Koncepcia jadrovej elektrárne tlakovodného typu zahrňuje návrh s výhľadom do budúcnosti, jeho alternatívy a riešenia. Tlakovodný reaktor patrí medzi najrozšírenejšie vo svete. Ide o reaktor, ktorého chladiivo i moderátor je voda. A pretože väčšina dnešných reaktorov využíva k chladeniu vodu ich koncepcia vzhľadom k podobnosti a mnohoročným skúsenostiam sa ukázala byť najperspektívnejšia.

## 2. História

Tlakovodný jadrový reaktor bol vyvinutý americkou firmou Westinghouse pred viac než štyrmi desiatkami rokov ako kompaktný zdroj energie pre americké námorníctvo. Jeho prednosti sa však ukázali natoľko významné, že bol prispôsobený i pre použitie v jadrových elektrárňach. Prvá generácia tlakovodných reaktorov sa komerčne používa od roku 1961, kedy bola spustená jadrová elektráreň Yankee Rowe v USA o výkone  $167 \text{ MW}_e$  /  $600 \text{ MW}_t$ . Tlakovodné reaktory boli ďalej vyvíjané a dnes sú bežne používané reaktory o výkone až  $1600 \text{ MW}_e$ .

Vôbec najpoužívanejšie sa tlakovodné reaktory stali taktiež preto, že firma Westinghouse predala licenciu na ich výrobu nemeckej firme Kraftwerk Union (Siemens), francúzskej Framatome a japonskej Mitsubishi Heavy Industries. Vlastný tlakovodný reaktor neskôr vyvinuli ďalšie dve americké firmy – Combustion Engineering a Babcock Wilcox. Takmer súčasne s USA bol tlakovodný reaktor vyvinutý v Sovietskom zväze, kde roku 1964 pripojujú na sieť Novoronežskú jadrovú elektráreň typu VVER o výkone  $210 \text{ MW}_e$ .

Obr. 2.1 Elektráreň Yankee Rowe, USA 1961





### 3. Súčasnosť

V súčasnej dobe patria práve k tým najrozšírenejším typom tlakovodné reaktory. Jadrová energetika prežíva „renesanciu“, vďaka zvyšovaniu energetických potrieb, problémami s alternatívnymi zdrojmi, ale aj stále sa prehĺbujúcou finančnou krízou. Rada zemí si začína uvedomovať, že jadrová energia nejde jednoducho nahradiť (samozrejme ak nepovažujeme ako alternatívu palivový cyklus uhoľných elektrární) súčasnosť, ale aj budúcnosť je taká, že ľudstvo sa bez tejto energie nezaobíde.

V súčasnosti (1.12.2009) je v prevádzke 615 blokov, z toho 388 je typu PWR a VVER. Taktiež na území ČR nájdeme tlakovodné reaktory, tak ako v Dukovanoch, tak aj v Temelíne. VVER 440 (v213) v Dukovanoch – 4 bloky, každý o elektrickom výkone 440MWe. VVER 1000 (v320) v Temelíne – 2 bloky s celkovým elektrickým výkonom 2000MWe. Na území ČR sa jadrové elektrárne podieľajú na 35 % výroby elektrickej energie. [16]

Od roku 1990 je v prevádzke aj školský ľahkovodný reaktor VR – 1 Vrabec, v areáli FJFI ČVUT v Prahe o menovitom výkone 1 KW<sub>t</sub>.

Tab.3.1 Súčasný stav blokov typu PWR a VVER v prevádzke

Typ	Počet jednotiek
PWR	264
VVER	5
VVER 1000	54
VVER 1500	4
VVER 440 (v 213)	34
VVER 440 (v 230)	27
<b>celkom</b>	<b>388</b>

## 4. Princíp a bezpečnosť

### 4.1 Princíp

V reaktore vzniká teplo pri štiepení jadier uránu  $^{235}\text{U}$ , obsiahnutých v jadrovom palive. Toto teplo je z reaktora odvádzané vodou, ktorá reaktorom preteká a ochladzuje jeho aktívnu zónu. Vysoký tlak, ktorý panuje v reaktore a v celom primárnom okruhu zabraňuje vode vo varení (odtiaľ názov tlakovodný reaktor). Z reaktora prúdi ohriata voda do tepelného výmenníka parogenerátora, kde svoju tepelnú energiu predáva vode cirkulujúcej v oddelenom sekundárnom okruhu. Tlak vody v tomto okruhu je nižší než v primárnom okruhu a voda v parogenerátore sa môže premeniť v paru o vysokej teplote a tlaku. Para z parogenerátoru prúdi do turbíny, ktorú roztáča pôsobením na jej lopatky. K premene pohybovej energie na elektrickú energiu dochádza v generátore, ktorého rotor roztáča turbína. Para je z turbíny odvádzaná do kondenzátora, kde kondenzuje na vodu. Chladenie kondenzátorov, v ktorých je para odoberaná a jej už nevyužitelná energia zaistuje tzv. tretí chladiaci okruh elektrárne. Jeho najznámejšiu časť tvoria mohutné chladiace veže, ktoré nenájdeme iba u elektrárne kde ide vodu z kondenzátoru ochladzovať v mori alebo veľkej rieke. Voda z kondenzátoru je vedená späť do parogenerátoru, kde sa znovu zmení na paru a prúdi do turbíny. Tým sa cyklus vody a pary v sekundárnom okruhu uzatvára. [6]

### 4.2 Bezpečnosť

Prednosťou tlakovodných reaktorov je vedľa ich jednoduchosti aj tzv. inherentná bezpečnosť. Tento termín vyjadruje, že k bezpečnostnému riadeniu reaktoru významne prispievajú fyzikálne princípy využité pri jeho konštrukcii. Voda, ktorá preteká reaktorom a ochladzuje ho zároveň umožňuje, aby jadrová reakcia vôbec prebiehala. Voda totiž spomaľuje uvoľnené rýchle neutróny na úroveň ich tepelnej energie, čím vzrastá pravdepodobnosť, že pri zrážke s jadrom atómu  $^{235}\text{U}$  toto jadro rozštiepi. Fyzikálne vlastnosti vody teda umožňujú, aby reťazová štiepna reakcia vôbec prebiehala, ale zároveň nedovoľujú, aby sa jej intenzita ľubovoľne zvyšovala, pretože so vzrastajúcou teplotou vody sa znižuje jej brzdiaci účinok na neutróny. Jedným z najdôležitejších princípov je tzv. princíp hĺbkovej ochrany definujúci päť úrovni ochrany a päť ochranných bariér stojacích medzi rádioaktívnymi látkami v reaktore a životným prostredím.

1. bariérou je pevná keramická štruktúra samotného paliva
2. bariérou je pokrytie palivových prútov
3. bariérou je tlaková hranica primárneho okruhu
4. bariérou je železobetónová šachta reaktoru
5. bariérou je ochranná obálka

Uplatňovanie princípu jadrovej bezpečnosti začína už pri výbere miesta, kde má byť elektráreň postavená. Takéto miesto musí vyhovovať rozsiahlemu súboru kritérií, ktoré vylučujú, že by nejaké prírodné podmienky alebo katastrofa mohla elektráreň ohroziť.

Maximálny prípustný tepelný výkon tlakovodných reaktorov je spravidla limitovaný:

- dosiahnutím teploty tavenia palivovej tablety
- dosiahnutím prestupu tepla prechodom bublinového na blanový var
- rýchlosťou oxidácie povlakov v havarijných podmienkach [6]

### **Bezpečnostné a prevádzkové požiadavky na reaktory v EU po roku 2020**

Podľa súčasných vývojových trendov sú aktuálne predovšetkým ľahkovodné reaktory generácie IV., ktoré nadväzujú na úspešné koncepcie generácie III+

Dá sa očakávať, že v priebehu ďalšieho vývoja sa uplatnia predovšetkým tieto tendencie:

- podstatné zjednodušenie konštrukcie reaktoru a technologických systémov jadrového zariadenia
- zvýšená účinnosť pasívnych chladiacich systémov, taktiež zvýšenie zásoby vody pri havarijnom dochladzovaní reaktoru
- použitie plnotlakovej ochrannej obálky, najčastejšie usporiadanie s dvojitém plášťom a odsávacím medzi priestorom
- integrované systémy riadenia a ochrán zvyšujúce celkovú spoľahlivosť ochranných bezpečnostných systémov
- skrátenie doby výstavby na 3 – 4 roky
- zjednodušenie technologických postupov umožňujúcich v prípade potreby ľahšiu výmenu komponentov. [8]

## 5. Rozdelenie

Reaktory môžeme deliť podľa počtu chladiacich okruhov na

- jednookruhové (výroba pary poprípade hélia prebieha v aktívnom priestore reaktoru)
- viacokruhové (teplo sa z reaktoru predáva sekundárnemu okruhu)

Niekedy sa medzi tieto dva okruhy vkladá z bezpečnostných dôvodov ešte ďalší okruh. (prípád chladenia tekutým sodíkom alebo roztavenými soľami)

Podľa neutrónového spektra

- tepelné
- rýchle

U tepelných spôsobujú tepelné neutróny s energiou  $\sim 0,025$  eV štiepenie ťažkých prvkov. Tie majú v aktívnej zóne moderátor, ktorý znižuje kinetickú energiu neutrónov na úroveň najvyššej pravdepodobnosti štiepenia. U rýchlych reaktorov vyvolávajú štiepenie rýchle, nespomalené neutróny. [6]

Podľa druhu moderátora

- ľahkovodné
- ťažkovodné
- grafitové

Ľahkovodné moderované ľahkou vodou  $H_2O$ . Ťažkovodné moderované  $D_2O$

Podľa druhu použitého chladivá

- chladené plynom
- chladené vodou
- chladené organickými látkami
- chladené tekutým kovom

Podľa toho či dochádza v reaktore k varu chladivá

- varné
- tlakovodné

Podľa štiepneho materiálu

- prírodný
- obohatený

Podľa formy paliva

- homogénne
- heterogénne

Podľa konštrukčného usporiadania

- s tlakovou nádobou
- s tlakovými kanálíkmi

Tab.5 Základné rozdelenie reaktorov

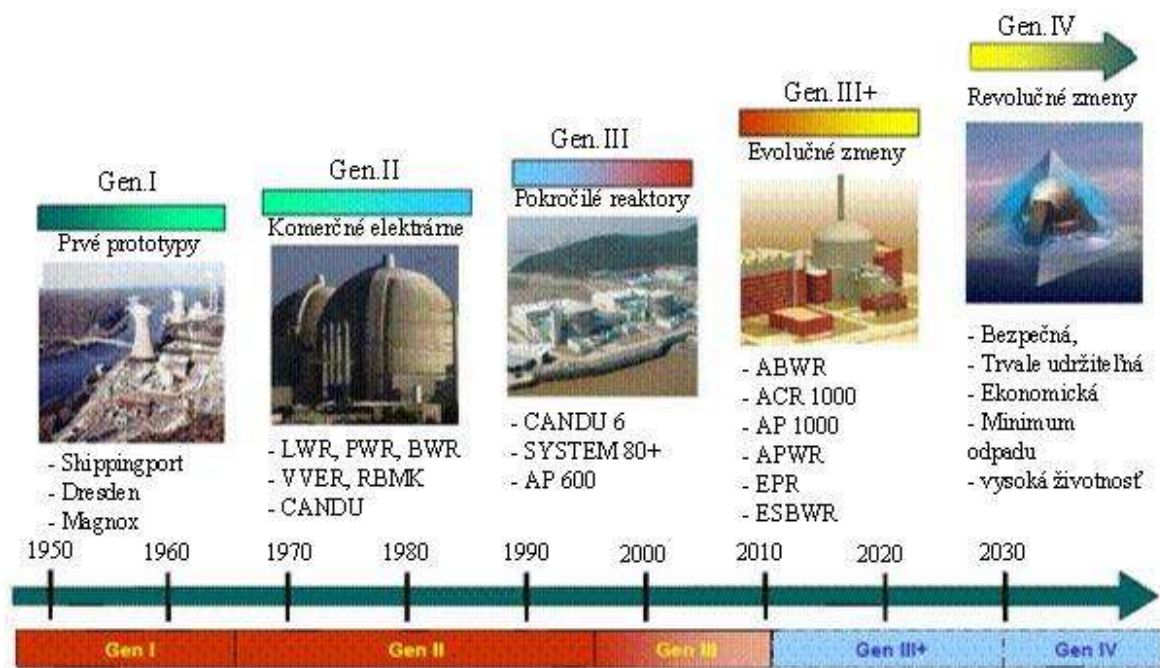
Typ reaktoru	Moderátor	Chladenie	Označenie
Tepelný	Ľahká voda	H <sub>2</sub> O	<b>Tlakovodný (PWR)</b>
			Varný (BWR)
	Grafit	CO <sub>2</sub>	Plynom chladený (GCR), zdokonalený (AGR)
		He	Vysokoteplotný (HTGR)
		H <sub>2</sub> O	Vodou chladený (LWGR)
	Ťažká voda	D <sub>2</sub> O	Ťažkovodný CANDU (PHWR)
		H <sub>2</sub> O	Ťažkovodný chladený obyčajnou vodou (HWLWR)
		CO <sub>2</sub>	Ťažkovodný, chladený plynom (HWGCR)
Rýchly	Bez moderátora	Na	Rýchly množinový (FBR)



## 6. Vývoj jadrovej energetiky

- **Generácia I:** V prípade prvej generácie jadrových elektrární šlo o jednotlivé prototypy, ktoré v podstate overovali možnosť energetického využitia jadra. Išlo o komerčné reaktory z 50. a 60. rokov.
- **Generácia II:** Druhá generácia vychádzala z koncepcií overovaných na reaktoroch I. generácie. Išlo o sériu elektrární projektovaných a postavených jednotne, ale s reaktormi patriacimi k rovnakému typu. Neskôr rôzne projekty nadväzovali na tie predošlé. V podstate ide o takmer všetky pracujúce komerčné reaktory súčasnosti. Éra začala v 70 rokoch minulého storočia. V podstate tieto reaktory tvoria základ jadrovej energetiky
- **Generácia III:** Reaktory III. generácie opäť nadväzovali na niektoré generátory II. generácie. Majú hlavne ďaleko lepšiu bezpečnosť, vlastnosti, dôraz sa kladie hlavne na bezpečnostné prvky. Do tejto kategórie spadá aj nový tlakovodný reaktor EPR budovaný vo Fínsku

Obr. 6 Vývoj jadrových reaktorov, [9]



- **Generácia III+ :** Ako generácia III+ sa označujú reaktory, ktoré majú vylepšené prvky pasívnej bezpečnosti. Tento stav bol dosiahnutý tým, že v prípade neštandardnej situácie sa dostane do bezpečnostného stavu automaticky bez akýchkoľvek aktívnych častí. Tieto reaktory by mali tvoriť základ jadrovej energetiky v ďalších desaťročiach. Mali by nahradiť dnešné jadrové elektrárne a prispieť tak ku zvýšeniu podielu jadrovej energetiky vo svete. S uvedením do

prevádzky sa počíta okolo roku 2010, zatiaľ prechádzajú vývojom. Do tejto skupiny patrí napr. americký AP1000.

- **Generácia IV:** Cieľom IV. generácie je prepracovať technológie vybraných šiestich perspektívnych typov jadrových reaktorov pre nasadenie po roku 2020. Veľká pozornosť je venovaná tým typom, ktoré vďaka vysokej teplote umožňujú okrem výroby elektrickej energie aj výrobu vodíka. Vodík sa stáva perspektívnym palivom využiteľným v budúcnosti predovšetkým v doprave. (náhrada ropných produktov). Taktiež sa kladie dôraz na zvýšenie účinnosti. Plán na ich využitie je naplánovaný na rok 2030, kde životnosť mnohých dnešných reaktorov končí.[9]

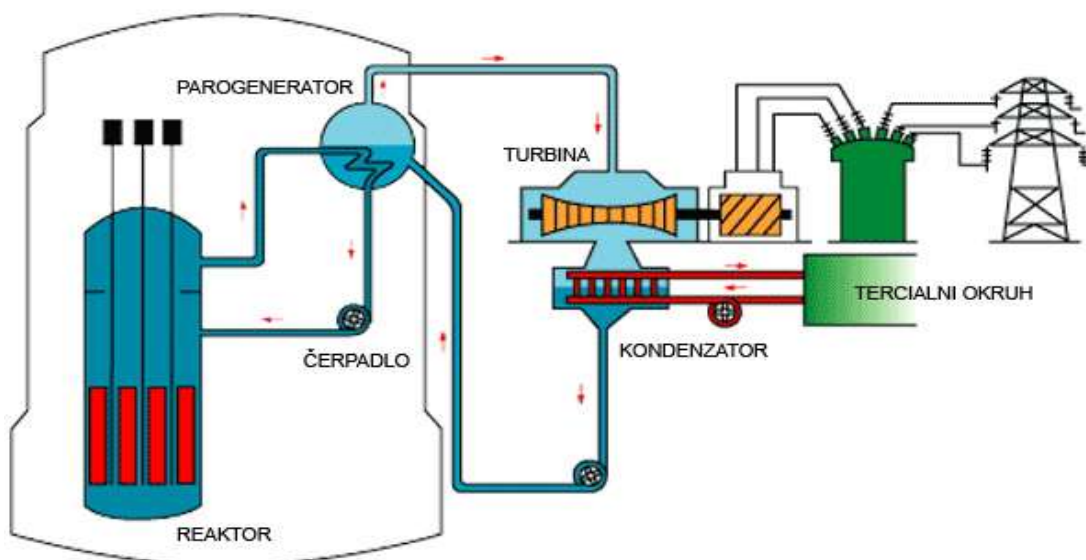
## 6.1 Vývoj jadrových elektrární tlakovodného typu

### 6.1.1 VVER 440

*Základné parametre 1000 MW reaktoru:*

- Palivo, obohatený urán vo forme oxidu uraničitého. Obohatený izotopom  $^{235}\text{U}$  na 3,1 – 4,4%
- Rozmery aktívnej zóny priemer 3m, výška 3,5m
- Tlak vody v reaktore 15,7 MPa
- Teplota vody na výstupe z reaktoru  $324^{\circ}\text{C}$
- Účinnosť elektrárne 32,7%
- Množstvo paliva v reaktore 60 – 80 ton

Obr. 6.1.1 Zjednodušené schéma VVER 440, [10]



Ide o heterogénny tlakovodný reaktor. Moderátor aj chladivo tvorí zároveň demineralizovaná voda s obsahom kyseliny bóritej  $\text{H}_3\text{BO}_3$  0-12 g/ kg  $\text{H}_2\text{O}$ . Vôkol reaktora je symetricky rozmiestnených 6 cirkulačných smičiek primárneho okruhu. Reaktorová nádoba je uložená v betónovej šachte a celou hmotnosťou je uložená vo vodnej biologickej ochrane. Typové označenie V 230, V 213.

Tento reaktor sa nachádza v jadrovej elektrárni Dukovany

- tepelný výkon 1375 MW
- tlaková nádoba je z legovanej ocele, priemer 3,56, výška 11,8m
- 312 kusov palivových kaziet s priemerným obohatením 2,5%, 37 absorpčných tyčí
- Hmotnosť paliva 42 ton
- Moderátor a chladivo ľahká voda (obyčajná)
- Tlak v reaktore 12,25 MPa
- Teplota chladivá sa pohybuje v rozmedzí 267 – 297 °C

### 6.1.2 VVER 1000

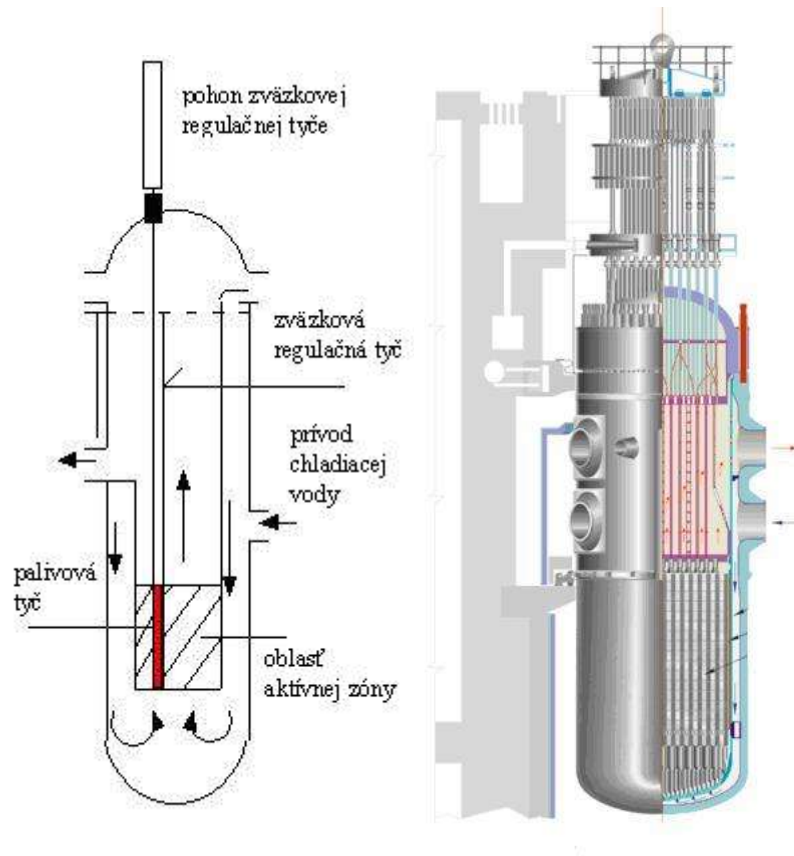
*Základné parametre 1000 MW reaktoru:*

- Palivo, obohatený urán vo forme oxidu uraničitého. Obohatený na 3 – 4 %
- Rozmery aktívnej zóny priemer 3,1m výška 3,6m
- Tlak vody v reaktore 15,7 MPa
- Teplota vody na výstupe z reaktoru 320 °C, vstupná teplota 209 °C
- Účinnosť elektrárne 33,7%
- Množstvo paliva v reaktore 60 – 90 ton
- Výkon 3120 MWt/1000 MWe

Chladivom je čistá demineralizovaná voda s prídavkom kyseliny bóritej, ktorá u tlakovodných reaktorov slúži k regulácií pomalých zmien reaktivity. Regulácia výkonu sa deje 2 spôsobmi. Rýchle zmeny sú korigované pomocou regulačných tyčí. Pomalé zmeny, ktoré vlastne súvisia s postupným vyhorením paliva sa kompenzujú zmenou koncentrácie kyseliny bóritej v chladive. Tento reaktor nájdeme aj v jadrovej elektrárni Temelín.

V rámci ruského štátneho programu „Ekologicky čistá energetika“, bol spracovaný projekt so zvýšenou pasívnou a inertnou bezpečnosťou VVER 640, ktorý zahrňuje väčšinu nových bezpečnostných systémov a je prvýkrát v ruskej praxi vyzbrojený dvojitém kontejnmentom. Ďalším vývojovým stupňom je vypracovanie unifikovaného projektu JE, ktorý by obstál aj pred bezpečnostnými požiadavkami IAEA. [14]

Obr. 6.1.2 Schéma reaktoru VVER 1000, [14]



VVER 1000 Temelín:

- tepelný výkon 3000 MW
- priemer tlakovej nádoby 4,5m, výška 10,9m
- 163 palivových článkov s priemerným obohatením 3,5 % a 61 regulačných tyčí
- hmotnosť paliva 92t
- moderátor a chladivo ľahká voda (obyčajná)
- tlak v reaktore 15,7 MPa
- teplota chladiva sa pohybuje v rozmedzí 267 – 297<sup>0</sup>C

### 6.1.3 EPR III+

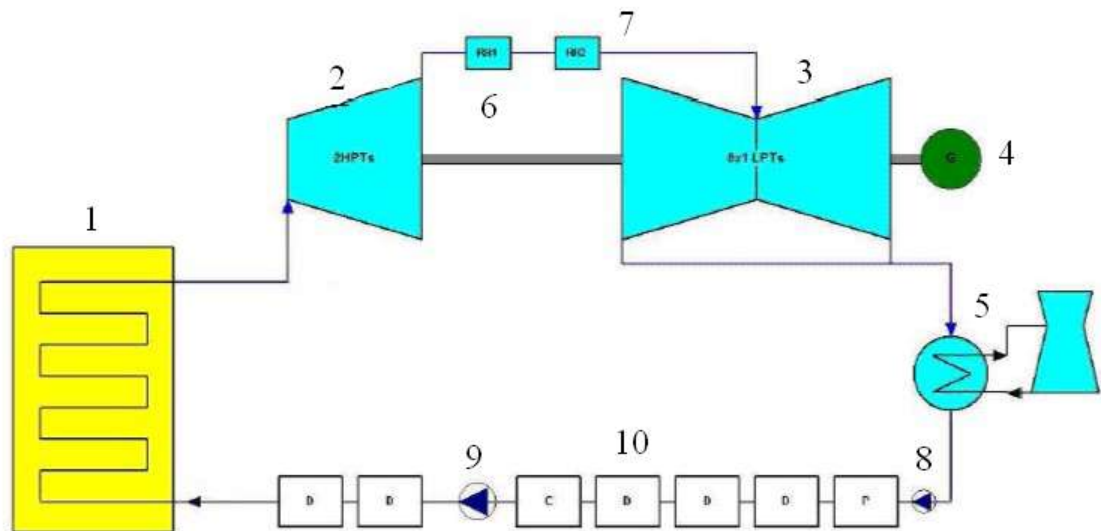
V posledných rokoch dochádza v EÚ k združovaniu veľkých spoločností s cieľom využiť potenciál niekoľkých výrobcov na medzinárodnú úroveň. K najznámejším patria Siemens a Framatome (NPI), spoločnosti Brown Boveri a ASEA – Atom na ABB za spolupráce Combustion Engineering práve za účelom vývoja nových projektov tlakovodných reaktorov. Práve táto aktivita prerástla v projekt reaktoru EPR.

V podstate sa jedná o evolučný projekt, vďaka mnohoročným skúsenostiam. Ide o kombináciu francúzskeho a nemeckého projektu, ktorý dokonale spĺňa očakávané bezpečnostné kritéria a zároveň konkuruje ďalším typom elektrární.

*Základné parametre:*

- výkon (4250 – 4500MWt)/(1600 – 1750MWe)
- tlak na výstupe 7,8 MPa
- vyhorenie paliva väčšie než 60 GWd/t
- účinnosť reaktoru 37%
- primárny okruh sa skladá zo 4 smičiek (4 okruhy cirkulácie)
- bezpečnostné funkcie rozdelené do 4 x 50%
- pravdepodobnosť ťažkej havárie menšia než  $10^{-6}$ /rok
- životnosť elektrárne projektovaná na 60 rokov
- palivo, oxid uráničitý mierne obohatený uránom  $^{235}\text{U}$  (do 5%), poprípade zmes MOX (Mixed Oxide Fuel) – zmes uránu a plutónia ( $\text{UO}_2$  a  $\text{PUO}_2$ )

Obr. 6.1.3 Zjednodušené tepelné schéma II. okruhu EPR III+, [12]



1 – parný generátor, 2 – stredotlaková časť parnej turbíny, 3 – nízkotlaková časť parnej turbíny, 4 – elektrický generátor, 5 – kondenzátor, 6 – odlučovač vlhkosti, 7 – predhrievač, 8 – kondenzačné čerpadlo, 9 – prečerpávacie čerpadlo, 10 – ohrievače napájajúcej vody

K hlavným súčastiam reaktoru EPR patrí:

- tlaková reaktorová nádoba
- cirkulačné čerpadlá
- parné generátory

Všetky tieto súčasti sa od predošlého desingu zväčšili, čo viedlo k zvýšeniu bezpečnosti, operatívnosti a výkonu. Sekcie bezpečnosti sú fyzicky oddelené od nezávislých trás, aby porucha jednej sekcie neovplyvnila tú druhú. K zaujímavosti reaktoru



patrí zariadenie bezpečnostného systému, tzv. špeciálna nádoba, ktorá pri roztočení aktívnej zóny zachytí taveninu, ktorou ochladí voda nádobu.

Budova reaktoru je dvojplášťová a je schopná vydržať náraz vojenského aj dopravného lietadla. Budovy umožňujúce chod reaktoru sú zámerne situované na opačných stranách, aby v prípade havárie lietadla bola zničená len jedna časť. [12]

Riadiace systémy reaktoru EPR sú projektované tak, aby zaistili rýchle sledovanie siete.

Manévrovacie schopnosti sú:

- postupná zmena výkonu v pásme 50 – 100%, možná rýchlosť 5%/min.
- skoková zmena 10% v pásme 20-100%
- zvýšenie výkonu o 20% behom 2 min.

#### **6.1.4 VVER III+**

*Základné parametre:*

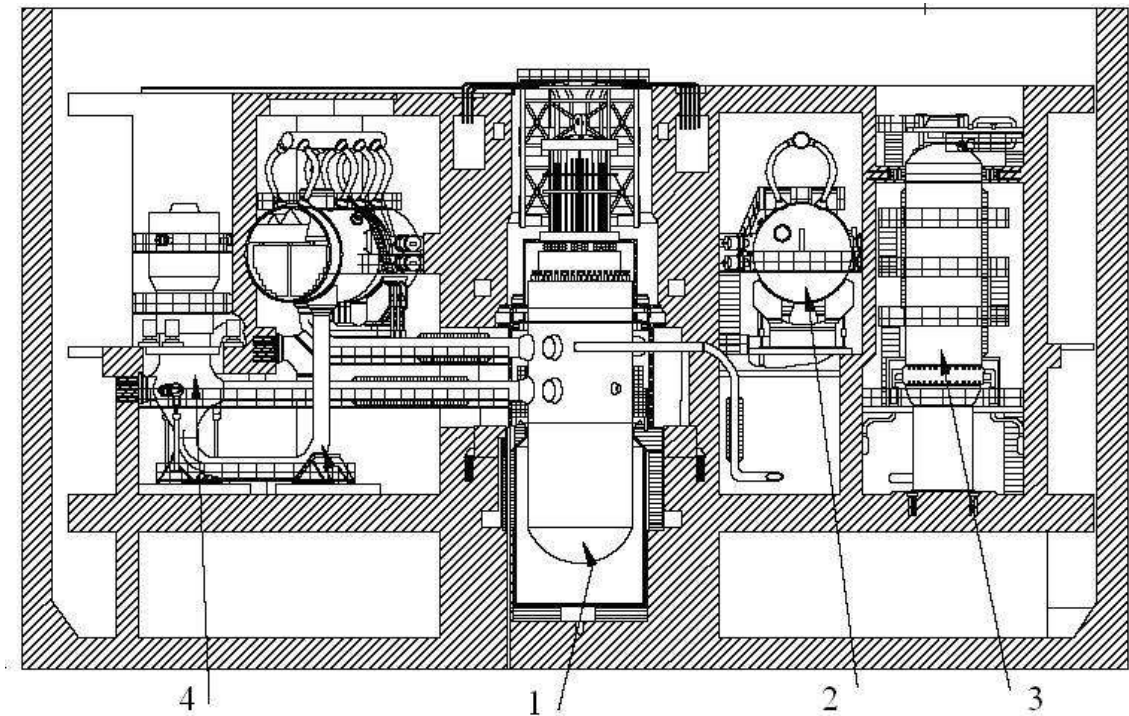
- reaktor V-407 o výkone 640 MWe

Aj napriek tomu, že reaktory VVER môžeme hodnotiť na základe pravdepodobnostných analýz ako dostatočné (VVER-440, VVER-1000), odpovedajú z hľadiska bezpečnosti súčasným medzinárodným štandardom, v Rusku hľadajú ďalšie alternatívy ako túto bezpečnosť zvýšiť a znížiť tak ich riziko v prevádzke.

Základné charakteristiky, vďaka ktorým sa projekt odlišuje od dnešných VVER reaktorov:

- automatické odstavenie a dochladzovanie reaktoru na báze pasívnych systémov pracujúcich aj bez zásahu operátora
- dvojité ochranné obálky
- kontrola tesnosti vnútornej ocelevej obálky za prevádzky reaktora
- možnosť chladenia prirodzenou konvenciou vnútornej ocelevej obálky
- riziko ťažkej havárie s tavením paliva  $10^{-6}$  1/rok

Obr. 6.1.4 Konceptia I. okruhu jadrovej elektrárne VVER III+, [9]



1 – reaktor, 2 – parný generátor, 3 – kompenzátor objemu, 4 – čerpadlo

Jedným zo základov pre vývoj práve tohto reaktora sa stali skúsenosti s prevádzkou predchádzajúcich typov reaktorov VVER 1000, ktoré sú taktiež v prevádzke v ČR. Cieľom projektu je výstavba (konceptia) nových spoľahlivejších jadrových elektrární s podstatne vyššími bezpečnostnými parametrami.

Bezpečnosť tejto jadrovej elektrárne je založená na princípe hĺbkovej ochrany s použitím systémov bariér zabráňujúcich migrácií ionizujúceho žiarenia a rádioaktívnych látok do životného prostredia.

Príkladom hĺbkovej ochrany sú nasledujúce opatrenia:

- postupné umiestnenie bariér proti úniku rádioaktívnych látok ( štruktúra paliva, pokrytie palivového článku, hranice primárneho okruhu)
- úvaha nad všetkými udalosťami, ktoré by mali za následok porušenie týchto bariér
- minimalizácia pravdepodobnosti havárií s únikom rádioaktivity
- systémy havarijného chladenia aktívnej zóny, pasívny systém zaplavovania aktívnej zóny, systém rýchleho dopĺňovania bóru
- dvojité betónový kontejment
- sofistikované riadiace systémy

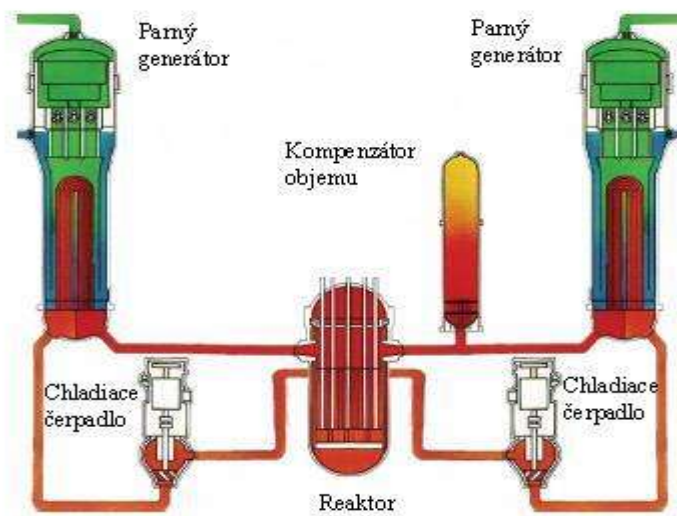
Cieľom všetkých týchto bezpečnostných systémov reaktora VVER je zaistenie toho, že pravdepodobnosť vážneho poškodenia aktívnej zóny nepresiahne  $10^{-6}$ /rok a pravdepodobnosť vážneho poškodenia aktívnej zóny spojená s únikom rádioaktivity do životného prostredia nepresiahne  $10^{-7}$ /rok. Otázkou však zostáva ako veľmi bude tento reaktor technologicky náročný na stavbu, údržbu a servis. [9]

### 6.1.5 AP 600 III+, 1000 III+ Westinghouse

*Základné parametre:*

- tepelný výkon 3415 MWt
- elektrický výkon 1117 MWe
- počet smičiek 2
- palivo  $\text{UO}_2/\text{MOX}$
- obohatenie U-235 2,35 – 4,45%
- max. teplota horkej vetvy, vedúcej z reaktora 321 °C

Obr. 6.1.5 Dvojitý I. okruh jadrovej elektrárne AP 1000 III+, [13]



Tieto reaktory vychádzajú z projektu tlakovodných reaktorov so zvýšenou bezpečnosťou firmy Westinghouse III. generácie.

Výhody:

- jednoduchý design
- modulované konštrukčné usporiadanie
- zvýšenie bezpečnosti zavedením pasívnych bezpečnostných systémov a nižšej hustoty energie v aktívnej zóne
- zjednodušenie ovládania a zníženie konštrukčných nákladov

Systémy pasívnej bezpečnosti sú tu podstatne jednoduchšie než u klasických reaktorov PWR. Využitím systémov pasívnej bezpečnosti s tepelnými výmenníkmi a autonómnym ochladzovaním vnútorného oceľového kontejnmentu, nad ktorým je umiestnená betónová ochranná obálka, sa podarilo podstatne znížiť počet čerpadiel, nádrží, výmenníkov, potrubí, ventilov a diesel-generátorov.

V prípade havárie aktívnej zóny alebo poškodenia tlakového okruhu parogenerátora dokážu tepelné výmenníky pasívneho systému v každom okruhu bezpečne odvádzať teplo prirodzenou cirkuláciou. Dve nádrže a dva tlakové vodné akumulátory majú za všetkých okolností dopĺňať chladiacu vodu s bórom. Behom prvých 10 hodín po havárii by sa kontejnment zaplavil vodou. Hromadiace sa teplo by následne odvádzal medzerou medzi oceľovým a betónovým plášťom kontejnmentu chladiaci vzduch bez potreby prívodu elektrickej energie. Činnosť tohto systému má byť natoľko automatizovaná, že v prvých 3 dňoch ťažkej havárie nebude potrebný zásah obsluhujúceho personálu. Koncentrácia rádioaktívnych splodín v kontejnmentu zníži pasívny sprchovací systém, ktorý využije vodu s prídavkom kyseliny bóritej v niekoľkých nádržiach, z nich bude automaticky vytlačovaná stlačeným dusíkom.

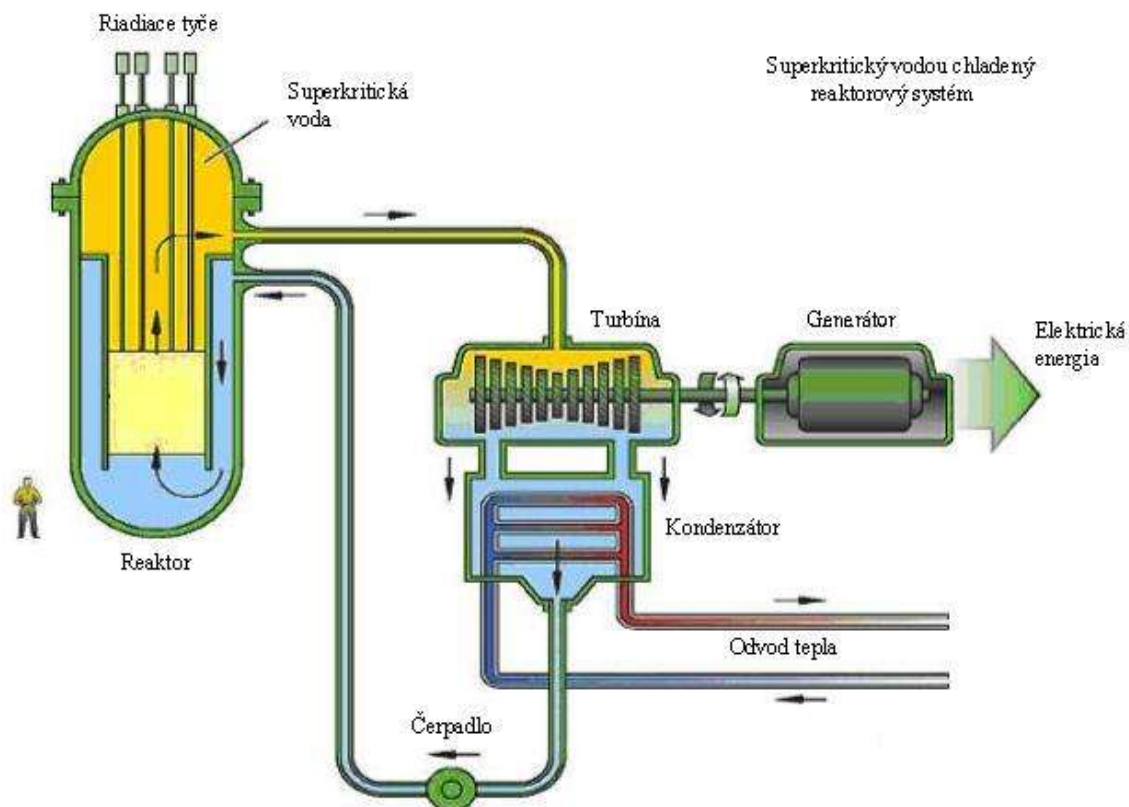
Vďaka tomu odpadá rada čerpadiel, potrubí, ventilov a riadiacich prvkov. Konštrukčne pripadajú na každý reaktor dva parogenerátory, spojené cez jednu teplú a dve studené vetvy a 4 napájacie čerpadlá. Výrobná cena elektriny sa pohybuje okolo 3,5 centa/kWh s dobou života 60 rokov. [13]

### 6.1.6 SCWR

*Základné parametre:*

- základné konštrukčné náklady 900 USD/kW<sub>e</sub>
- výkon a tepelné spektrum neutrónu 1700 MW<sub>e</sub>
- čistá účinnosť 44%
- vstupná / výstupná teplota a tlak 280/510 °C pri 25 MPa
- merný objemový výkon  $\sim 100 \text{ MW}_t/\text{m}^3$
- referenčné palivo UO<sub>2</sub>, pokryté austenitickou popr. martenzitickou nerezovou oceľou alebo zliatiny Ni
- materiál, vysoko pevnostné zliatiny
- vyhorenie, poškodenie  $\sim 45 \text{ GWd/t}$ , 10 - 30 dpa

Obr. 6.1.6 Super kritický vodou chladený jednookruhový systém, [7]



Ide o vysokoteplotný, vysokotlakový reaktor, pracujúci nad termodynamickým kritickým bodom vody (22,1 MPa, 374 °C). V tomto prevedení Rankinovho cyklu môžeme dosiahnuť až 44% čistej tepelnej účinnosti. V popredí sú hneď dve konštrukčné možnosti palivového cyklu.

Prvý je otvorený uránový cyklus s reaktorom na tepelné neutróny, druhý následne uzavretý s rýchlymi neutrónmi. U varianty s tepelnými neutrónmi bude závisieť na úspechu vo výskume a vývoji materiálu. Možnosť s tepelnými neutrónmi bude kvôli nízkej hustote super kritickej tekutiny pridaný dodatočný moderátor, aby termalizoval neutróny v aktívnej zóne.

V oboch prípadoch bude mať referenčná elektrárňa výkon asi 1700 MW<sub>e</sub> pri prevádzkovom tlaku 25 MPa a teplotu vody približne 280 °C na vstupe a 510 °C na výstupe.

System má niektoré unikátne vlastnosti, ktoré nám dávajú značné výhody v porovnaní so súčasnými systémami LWR a to:

- vyššia tepelná účinnosť
- nižší prietok chladiva, čo vedie k redukcii veľkosti chladiacich čerpadiel, potrubí a s tým súvisiacich zariadení
- nižšie množstvo chladiva
- neexistujúca varná kríza, spôsobená neexistujúcou druhou fázou chladiva v reaktore
- absencia vysúšačov pary, separátorov, parogenerátorov a obehových čerpadiel

Technologický základ SCWR môžeme nájsť v existujúcich LWR reaktoroch a komerčných super kritických, vodou chladených, uhlia spaľujúcich elektrárnach. Doposiaľ nebol vybudovaný ani testovaný žiaden SCWR reaktor a neprebehli testy vo vnútri reaktora pre materiály primárneho okruhu.

Technologické nedostatky:

- SCWR materiály a ich štruktúra (korózia, rádiolýza a chémia vody, objemová analýza)
- Bezpečnosť SCWR, stabilita výkonného toku v priebehu prevádzky
- Prevedenie elektrárne

Oblasti ďalšieho vývoja:

Prostredie zo super kritickou vodou je unikátne a existuje minimum dát o chovaní materiálu po ožiarení pri daných teplotách a tlakoch. Zatiaľ nebol zvolený ani materiál paliva a pokrytia, ani ďalších konštrukčných materiálov.

Požiadavky na pokrytie paliva budú oveľa vyššie u reaktora s rýchlym spektrom neutrónov než u tepelného. Väčšina testov ožiarenia bude prebiehať priamo v testovacom reaktore, ničmenej ožiarenie na báze uryhľovačov, schopných produkovať vysoké prúdy ľahkých iontov, sa javí ako lacná a rýchla alternatíva pre skúšky korózie a mikroštruktúrnej stability. Ďalší vývoj bude musieť vyriešiť otázky týkajúce sa bezpečnosti, transportných vlastností, prejavov LOCA, nehody spojené so stratou chladiva, stability výkonového toku a konštrukcie, zatiaľ čo samostatný reaktorový systém, palivový cyklus a bilancia elektrárne nevyžaduje ďalší podstatný výskum. [7]

## 7. Porovnanie

V tejto časti sa budem snažiť porovnať jadrové elektrárne tlakovodného typu. VVER 440 a VVER 1000. Vychádzajú ešte z koncepcií overovaných na reaktoroch I. generácií. Ich éra začala v 70. rokoch a základ jadrovej energetiky tvoria dodnes.

Čo sa týka reaktorov III, III+ a IV generácie ich porovnanie nemôže byť objektívne, pretože oproti dnešným reaktorom sú pozadu približne 40. rokov a ich vývoj je v súčasnej dobe na svojom začiatku. Reaktory tlakovodného typu, ktoré patria do týchto generácií som sa snažil popísať v kapitole 6.1 Vývoj jadrových elektrární tlakovodného typu. Tieto generácie kladú dôraz hlavne na bezpečnostné vlastnosti ako intenzívnejšie využitie paliva, výmenu paliva, životnosť elektrární. Taktiež sa kladie dôraz na ekonomiku výstavby a prevádzky, cenu a dĺžku stavby, prevádzkové náklady a efektivitu, uzavretý palivový cyklus, využitie potenciálu štiepateľného materiálu a v neposlednom rade redukciu rádioaktívneho odpadu.

Tlakovodné reaktory pracujúce v súčasnosti majú stupeň vyhorenia okolo 50 GWd/t, počíta sa však s postupným zvyšovaním vyhorenia až na 60 GWd/t u palív s  $\text{UO}_2$  a 45 GWd/t u MOX palív s účinnosťou 30 – 38 % pri premene klasickým Rankin – Clausiovým cyklom. Reaktor SCWR by mal mať vďaka nízkemu obohateniu vyhorenia 45 GWd/t a účinnosť niečo cez 44% pri super kritickom Rankin – Clausiovom cykle. Predpokladané konštrukčné náklady by mali byť okolo 900 USD/kW<sub>e</sub> u systému SCWR v porovnaní s 1200 USD/kW<sub>e</sub> u AP 1000, čo je dnes najlacnejší reaktor na trhu. Výrobné a prevádzkové náklady by potom mali byť až o 35 % nižšie. Taktiež netreba zabudnúť, že systém SCWR je veľmi podobný dnešným PWR reaktorom. Preto by mohol zaujať spoločnosti, ktoré majú s týmito reaktormi mnohoročné skúsenosti.

Tab. 7.1 Porovnanie reaktorov Gen. III a Gen. IV tlakovodného typu

Typ reaktoru	Výkon	Účinnosť
Gen. III.	MWe/MWt	%
EPR	1600/4444	36
AP600	600/1933	31
AP1000	1154/3415	33
VVER1000	1000/3120	32
Gen. IV.		
SCWR	1700 MWe	44

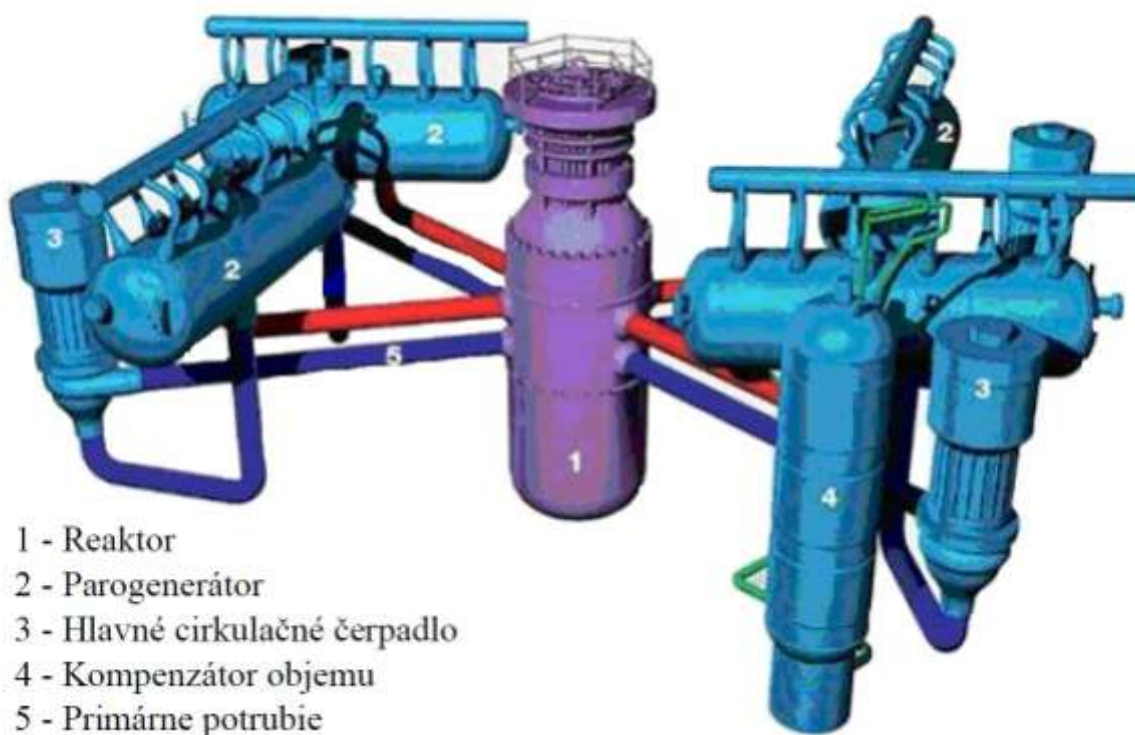
## 8. Primárny okruh jadrovej elektrárne

Primárnym okruhom jadrovej elektrárne je systém zariadení, v ktorom sa jadrová energia mení na tepelnú.

Základné zariadenia tohto okruhu:

- Reaktor
- Parogenerátor
- Hlavné cirkulačné čerpadlo
- Kompenzátor objemu
- Primárne potrubie

Obr. 8.1 Primárny okruh jadrovej elektrárne VVER 1000



Zdrojom tepelnej energie v jadrovej elektrárni je štiepna reakcia, ktorá prebieha v aktívnej zóne reaktora. Tepelnú energiu odvádza z reaktora chladiaca voda, ktorá prúdi okolo palivových článkov prostredníctvom šiestich cirkulačných slučiek pripojených na reaktor. Vysoký tlak, ktorý je v reaktore a v celom primárnom okruhu, zabraňuje vode vriť. Z reaktora postupuje zahriata voda cez hlavné uzatváracie armatúry do parogenerátorov, kde odovzdáva svoju energiu vode sekundárneho okruhu.



Tlak vody v sekundárnom okruhu je nižší ako v primárnom okruhu a sekundárna voda v parogenerátore sa premieňa na paru. Ochladená voda primárneho okruhu sa vracia z parogenerátorov späť do aktívnej zóny reaktora cez hlavné cirkulačné čerpadlá, ktoré udržiavajú obeh vody v primárnom okruhu. Na jednu z cirkulačných slučiek je pripojený kompenzátor objemu, ktorý vyrovnáva zmeny objemu vody pri zmene výkonu reaktora a súčasne udržiava tlak chladiacej vody v primárnom okruhu na konštantnej hodnote.

## **8.1 Jadrový reaktor**

Technologické zariadenie určené na uvoľňovanie jadrovej energie a na jej premenu na energiu tepelnú. Zdrojom energie je štiepna reťazová reakcia v jadrovom palive, ktorá sa týmto intenzívne ohrieva. Teplo sa z paliva odvádza pomocou chladiwa a ďalej využíva. K štiepeniu uránu dochádza tepelnými neutrónmi, na ktorých spomalenie sa používa moderátor – upravená voda, ktorá je zároveň aj chladivom. Reťazová reakcia prebieha v aktívnej zóne reaktora. Uvoľnené teplo prestupuje do chladiwa primárneho okruhu. Aktívna zóna je s ďalšími súčasťami jadrového reaktora umiestnená v jej nádobe, ktorá tvorí bariéru proti úniku rádioaktívnych látok mimo reaktor. Jadrové reakcie prebiehajúce v reaktore sú zároveň zdrojom rádioaktívneho žiarenia.

## **8.2 Parogenerátor**

Tlakový tepelný horizontálny výparníkový výmenník, v ktorom voda primárneho okruhu ( v parogenerátore prúdiaca v tlakových trubkách) predáva svoje teplo vode sekundárneho okruhu. Pretože teplota vody primárneho okruhu je vyššia než teplota varu vody sekundárneho okruhu (tlak vody v primárnom okruhu je totiž viac ako dvojnásobný proti tlaku vody či pary sekundárneho okruhu), dochádza v parogenerátore k intenzívnemu vývinu pary, ktorá je parovodom vedená na turbínu.

## **8.3 Hlavné cirkulačné čerpadlo**

Hlavné cirkulačné čerpadlá v jadrových elektrárnach zaisťujú prietok chladiwa (vody) cez aktívnu zónu reaktora. Čerpadlo je umiestnené na vratnej vetve každej cirkulačnej slučky, to znamená, že čerpá vodu vychádzajúcu z parného generátora späť do reaktora. Čerpadlo aj elektromotor tvoria buď celok v jednom puzdre, alebo je motor umiestnený mimo čerpadla. Čerpadlá sa prevádzkujú pri konštantných alebo premenných otáčkach. Zmeny otáčok sa dosahujú zmenou kmitočtu napájacieho prúdu motorov. Primárny okruh obsahuje štyri hlavné cirkulačné čerpadlá.

## **8.4 Kompenzátor objemu**

Kompenzátor objemu je jedným z dôležitých častí primárneho okruhu jadrovej elektrárne. Pomáha udržiavať stály tlak. Ide o mohutnú valcovú nádobu, ktorá je umiestnená zvislo v blízkosti cirkulačného potrubia primárneho okruhu. Je spojená s potrubím jednej slučky. Veľké zmeny tlaku sú z hľadiska spoľahlivej prevádzky jadrových elektrární nežiaduce a preto sa na ich obmedzenie používa kompenzátor objemu. Čiastočne je naplnený vodou a čiastočne parou, ktorá sa z vody samovoľne vytvára. Pokiaľ je nutné tlak v primárnom okruhu znížiť, spustí sa sprcha, ktorá je uložená v hornej časti kompenzátora a z tejto sprchy tečie chladnejšia voda. Para v kondenzátore skondenzuje na vodu a jej tlak klesne.

## **8.5 Primárne potrubie**

Horúca vetva potrubia primárneho okruhu zabezpečuje transport tepelného média z reaktora do parného generátora. Táto časť potrubia vedie vodu zohriatu v reaktore (horúca vetva). Potrubie je tvorené legovanou oceľou s nerezovou navarenou výstelkou na vnútornom povrchu. Studená vetva potrubia primárneho okruhu zabezpečuje transport tepelného média z parného generátora do reaktora. Táto časť potrubia vedie vodu ochladenú v parnom generátore (studená vetva). [15]

## 9. Sekundárny okruh jadrovej elektrárne

Sekundárnym okruhom jadrovej elektrárne je systém zariadení, ktorý umožňuje premeniť tepelnú energiu pary v mechanickú energiu rotora parnej turbíny.

Základné zariadenia tohto okruhu:

- turbína a generátor
- kondenzátor
- kondenzačné a napájacie čerpadlo
- regeneračné ohrievače

V sekundárnom okruhu sa premieňa tepelná energia pary vyrobenej v parogenerátoroch na elektrickú. Para z parogenerátora prúdi do turbíny, ktorá má vysokotlakovú časť a nízkotlakovú časť. Expanzia tlakovej pary medzi lopatkami rotora turbíny spôsobuje jeho točenie. K premene pohybovej energie na elektrickú dochádza v generátore, ktorého rotor je pevne spojený s rotorom turbíny. Po expanzii pary v nízkotlakovej časti a znížení teploty v turbíne sa v kondenzátoroch para mení na vodu.

Chladenie kondenzátorov, v ktorých je para odnímaná jej už nevyužitelná energia, zaisťuje tretí, tzv. cirkulačný chladiaci okruh elektrárne. Jeho najväčšiu časť tvoria chladiace veže, kde sa voda zohriata v kondenzátoroch ochladzuje. Kondenzát vznikajúci z pary je vedený späť do parogenerátora, kde sa znovu mení na paru a prúdi do turbíny. Cyklus v sekundárnom okruhu sa týmto uzatvára.

### 9.1 Parná turbína, generátor

Rotačný tepelný motor, v ktorom sa vnútorná energia pary premieňa na rotačnú mechanickú energiu rotora turbíny. U rovnotlakových turbín sa tlakový spád pary mení v rozvážacích lopatkách statoru na kinetickú energiu pary, ktorá je predávaná prostredníctvom obežných lopatiek rotora. Rotor turbíny je spojený s rotorom generátora, kde sa transformuje kinetická energia rotora na energiu elektrickú.

- Vysokotlakový stupeň – päť stupňové dvojprúdové teleso s odberom pre tepelnú úpravu vody. Jeho výkon je 400 MW, 40 % celkového výkonu turbíny
- Nízkotlakový stupeň – je tvorený tromi dvojprúdovými telesami a štyrmi stupňami. Za každým stupňom je odoberaná para pre teplárenské účely. Nízkotlakové teleso je dvojplášťové. V priestore vonkajšieho plášťa, ktorý je spojený s telesom kondenzátora je za prevádzky vákuum.

Generátor, elektrický stroj vyrábajúci elektrickú energiu. Delí sa alternátor, vyrábajúci striedavý elektrický prúd a dynamo, ktoré vyrába jednosmerný striedavý prúd.

Obr. 9.1 Turbína 1600 MWe EPR III+



## 9.2 Kondenzátor

Tepelný výmeník, v ňom para po expanzii v turbíne a po ochladení chladiacou vodou kondenzuje. Prilieha tesne k spodnej časti nízkotlakového dielu turbíny. Para z turbíny prechádza medzi trúbkami, ktorými preteká chladiaca voda a na ich povrchu kondenzuje. Skondenzovaná para (kondenzát) je kondenzačnými čerpadlami cez úpravu kondenzátu, regeneračné výmenníky a odplynenia dopravovaná do parogenerátora. Kondenzačné teplo sa odvádza chladiacou vodou do chladiacej veže, alebo v prípade prietochného chladenia do vodného toku

### **9.3 Nízkotlakové a vysokotlakové regeneračné ohrievače**

Tepelné výmenníky, v ktorých para z neregulovaných regeneračných odberov turbíny predáva svoje kondenzačné teplo kondenzátu alebo napájacej vode parogenerátora. V nízkotlakových regeneračných výmenníkoch je kondenzát postupne ohrievaný na bod varu tak, aby v odplyňovacej nádrži mohol byť zbavený plynu v ňom rozpustených. Vo vysokotlakových regeneračných ohrievačoch je v odplyňovacích nádržiach plynu zbavená napájacia voda zahriata na teploty blízke bodu varu v parogenerátore.

### **9.4 Kondenzačné a napájacie čerpadla**

Kondenzačné čerpadlá slúžia k čerpaniu kondenzátu z kondenzátora turbín cez nízkotlakové regeneračné ohrievače do odplyňovacej nádrže. Napájacie čerpadlá dopravujú napájaciu odplynenu vodu z odplyňovacích nádrží cez vysokotlakové regeneračné ohrievače do parogenerátora a súčasne zvyšujú tlak napájacej odplynenej vody na tlak generovanej pary.

### **9.5 Obehové čerpadla**

Čerpadlo je stroj na prepravu kvapalín a ďalších materiálov v tekutom stave. Obehové čerpadlá zaisťujúce cirkuláciu vody medzi kondenzátormi turbín a chladiacimi vežami.

[15]

## 10. Výpočet parametrov sekundárneho okruhu elektrárne

Účelom výpočtu je určenie jednotlivých parametrov sekundárneho okruhu elektrárne VVER 440. Jadrová elektráreň má tlakovodný reaktor, ktorý predáva teplo tlakovej vode primárneho okruhu. V sekundárnom okruhu je jedna kondenzačná turbína na sýtu paru. Medzi stredotlakovou a nízkotlakovou časťou je prevedené odlúčenie vlhkosti s nasledujúcim prehriatím admisnej pary. Ohrev napájacej vody odberovou parou prebieha v 6 ohrievačoch.

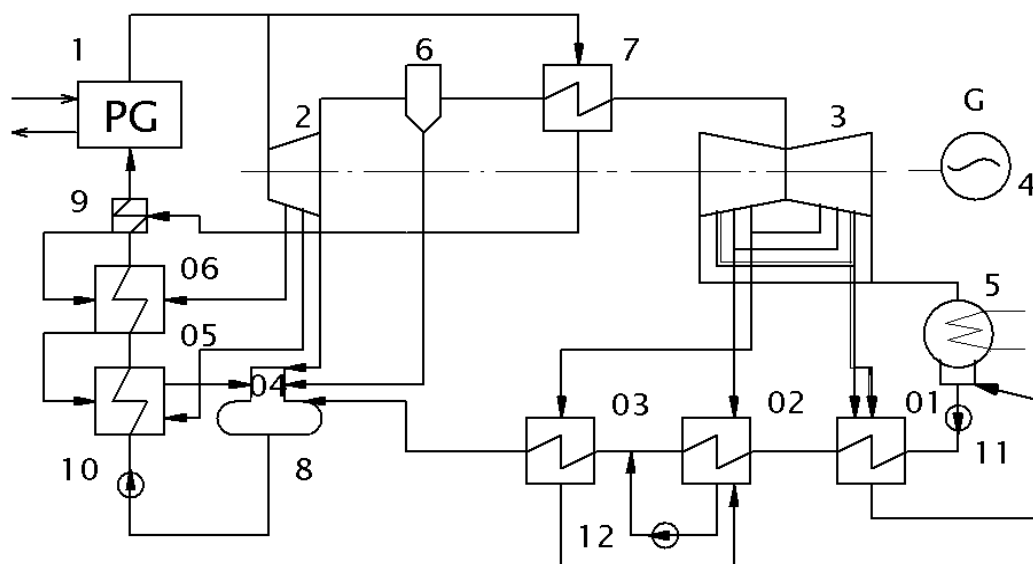
**Výpočet:**

- 1, Výpočet expanzie pary v turbíne
- 2, Výpočet ohrievania napájacej vody
- 3, Výpočet účinnosti navrhnutej elektrárne

### Predpoklady:

Vychádzam zo zjednodušenej tepelnej schémy sekundárneho okruhu elektrárne VVER 440

Obr. 10.1. Tepelné schéma sekundárneho okruhu elektrárne



1 – parný generátor, 2 – stredotlaková časť parnej turbíny, 3 – nízkotlaková časť parnej turbíny, 4 – elektrický generátor, 5 – kondenzátor, 6 – odlučovač vlhkosti, 7 – prihrievač, 01 – 02 – 03 -04 -05 – 06 – ohrievače napájacej vody, 8 – odplyňovač, 9 – chladič kondenzátu, 10 – napájacie čerpadlo, 11 – kondenzačné čerpadlo, 12 – prečerpávacie čerpadlo .

Na obrázku 10.1. je schematicky znázornený sekundárny okruh elektrárne.

- Odpad z parného generátora je 1 %.
- Tepelné straty zanedbávam.
- Tlaková strata medzi parným generátorom a turbínou je 2,5 % z  $p_{pg}$ .
- Strata na regulačných ventiloch turbíny je  $12,5 \text{ kJ kg}^{-1}$ .
- V odlučovači vlhkosti sa vlhkosť odlúči až na hornú medznú krivku.
- K prehrievaniu pary za stredotlakovým dielom je použitých 6 % admisnej pary.
- Tlaková strata v odlučovači vlhkosti, prehrievači pary a v spojovacom potrubí je 15 % z  $p_{el}$ .
- Behom expanzie sa v nízkotlakovom diele predpokladá jedno odlúčenie 3 % vlhkosti
- Strata výstupnej rýchlosti pary z turbíny je  $\Delta i_z = 30 \text{ kJ.kg}^{-1}$ .
- Tlak v kondenzátore turbíny je 3,92 kPa, entalpia kondenzátu  $i_0 = 119,9 \text{ kJ.kg}^{-1}$ .
- Straty z upchania sú zanedbané.
- Mechanická a elektrická účinnosť turbogenerátora je  $\eta_{me} = 0,983$ .
- Koncový rozdiel teplôt v nízkotlakových regeneračných ohrievačoch je  $2^\circ \text{ C}$ , v stredotlakových je  $3^\circ \text{ C}$ .
- Tlaková strata medzi turbínou a regeneračnými ohrievačmi je 10 % z  $p_{oj}$ .
- Príkon obehových čerpadiel je zanedbaný.

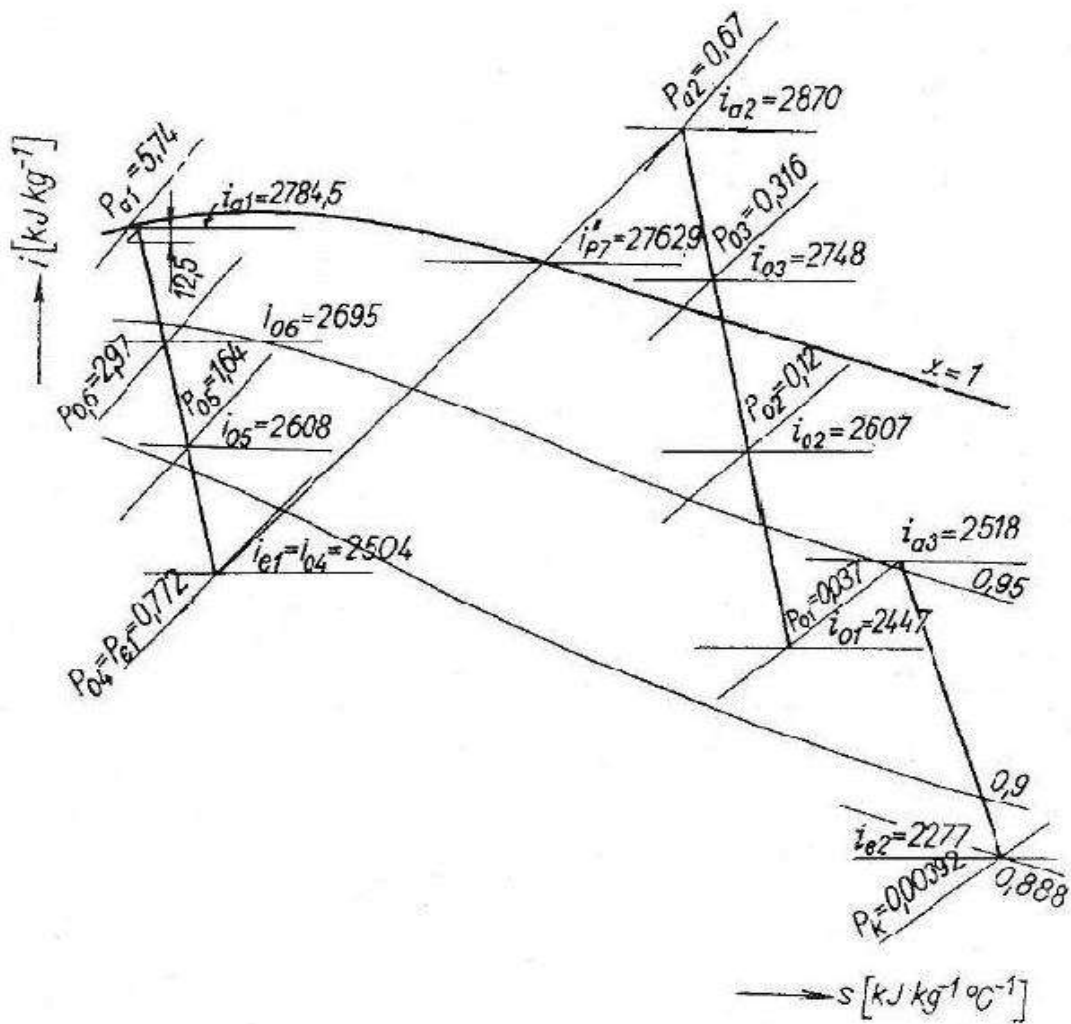
## 10.1 Výpočet expanzie pary v turbíne

Z parného generátora vystupuje syta para o tlaku  $p_{pg} = 5,89 \text{ MPa}$ , ktorej prislúcha teplota sýtosti  $274,3^\circ \text{ C}$ . U parného generátora bez ekonomizéra je minimálny teplotný rozdiel určený rozdielom teplôt sytej pary a primárneho chladivá na výstupe z parného generátora, takže  $\Delta t_{\min} = 18,7^\circ \text{ C}$ .

Tlak pred turbínou  $p_{a1} = 0,975 p_{pg} \Rightarrow 5,74 \text{ MPa}$ . (tlaková strata medzi parným generátorom a turbínou 2,5% z  $p_{pg}$ .) Priebeh expanzie v turbíne je znázornený na obr. 10.2.

Tlak za stredotlakovým dielom je v danom prípade určený tlakom v odplyňovači, kde teplote  $165^\circ \text{ C}$  odpovedá  $p_s = 0,701 \text{ MPa}$ .

Obr. 10.2 Pribeh expanzie pary v parnej turbíne (hodnoty tlakov v MPa), [1]



Odpovedajúci odberový tlak je  $p_0 = p_{e1} = 0,77$  MPa. Určením expanznej čiary stredotlakového dielu ide získať ostatné parametre:

$i_{a1} = 2784,5 \text{ kJ.kg}^{-1}$ , merná entalpia na vstupe do 1 dielu turbíny

$i_{e1} = 2504 \text{ kJ.kg}^{-1}$ , merná entalpia na výstupe do 1 dielu turbíny

$\Delta i_{ST} = 280,5 \text{ kJ.kg}^{-1}$ , príslušný užitočný spád

$1 - x_{vyst} = 12,5 \%$ , strata na regulačných ventiloch turbíny

$\eta_{ST} = 0,797$ , vnútorná termodynamická účinnosť stredotlakového dielu turbíny

Parametre určené z obr. 10.2.



V separátore sa odlučuje 12,5 % vody (na hornú medznú krivku). V prehrievači je k prehrievaniu použitej 6 % admisnej pary, čomu odpovedá  $y_1 = 0,06$ .

Z tepelnej bilancie predhrievača, vzťahujúca sa na 1 kg pary vystupujúcej z parného generátora, plynie

$$(1 - y_1)(i_{a2} - i_{v7}) = y_1(i_{a1} - i_{v7}) \quad (1)$$

$$(1 - 0,06)(i_{a2} - 2762,9) = 0,06(2784,5 - 1200) \Rightarrow i_{a2} = 2870 [kJ.kg^{-1}]$$

Kde  $i_{v7} = 1200 kJ.kg^{-1}$  je entalpia kondenzátu topnej pary.

Odtiaľ  $i_{a2} = 2870 kJ.kg^{-1}$ , merná entalpia na vstupe do 2 dielu turbíny,

$p_{a2} = 0,67 \text{ MPa}$ , merný tlak na vstupe do 2 dielu turbíny,

$t_{a2} = 211^\circ\text{C}$ , merná teplota na vstupe do 2 dielu turbíny,

Parametre určené z obr. 10.2. Tlaku  $p_{a2}$  odpovedá teplota  $t_{a2}$ , [5]

Hodnoty odberových tlakov sú určené teplotami  $t_{v1}$  až  $t_{v5}$  navrhutej tepelnej schémy. Na základe uvedených predpokladov a odčítaní z  $i - s$  diagramu bola zostavená výsledná tab. 10.1.

Tab.10.1. Výpočtová tabuľka ohrievania napájacej vody

Veličina	Označenie	Rozmer	Ohrievač					
			01	02	03	04	05	06
Teplota za ohrievačom	$t_{vj}$	$^\circ\text{C}$	70	100	130	165	195	225
Entalpie za ohrievačom	$i_j$	$kJ.kg^{-1}$	293,8	419,6	546,6	697,3	833,0	968,4
Teplota sýtosti odberovej pary	$t_{sj}$	$^\circ\text{C}$	72	102	132	165	198	228
Odpovedajúci tlak	$p_{sj}$	MPa	0,034	0,109	0,278	0,701	1,491	2,697
Odpovedajúce entalpie	$i_{sj}$	$kJ.kg^{-1}$	301,4	427,5	554,8	697,3	843,4	980,9
Odberový tlak	$p_{oj}$	MPa	0,037	0,120	0,316	0,772	1,640	2,970
Entalpie v mieste odberu	$i_{oj}$	$kJ.kg^{-1}$	2447	2607	2748	2504	2608	2695

Teplota za ohrievačom ( $t_{vj}$ ) je daná meraním. Entalpie za ohrievačom ( $i_j$ ) som určil z tabuliek z termomechaniky [5]. Teplota sýtosti odberovej pary ( $t_{sj}$ ) je daná koncovým rozdielom teplôt v nízkotlakových a stredotlakových regeneračných ohrievačoch. (základné charakteristiky)

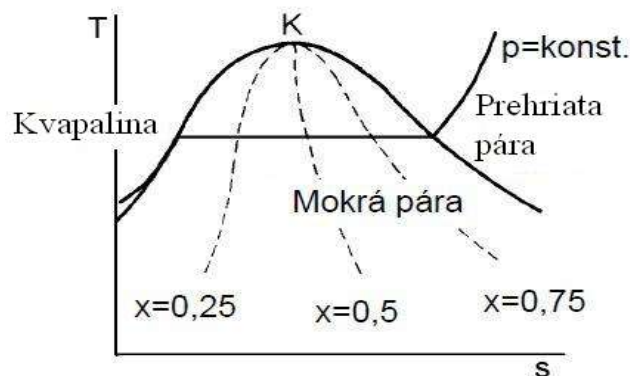
Odpovedajúci tlak ( $p_{sj}$ ), [5] v závislosti na teplote a entalpií za ohrievačom. Odpovedajúce entalpie ( $i_{sj}$ ), [5] na základe teploty sýtosti odberovej pary. Odberový tlak ( $p_{oj}$ ) predstavuje tlakovú stratu medzi turbínou a regeneračnými ohrievačmi. Entalpie v mieste odberu ( $i_{oj}$ ) na základe entalpie mokrej pary:

$$i_x = i' + x(i'' - i') \Rightarrow i_x = 980,9 + 0,94(2804 - 980,9) = 2695 [KJ.kg^{-1}] \quad (2)$$

kde  $x$  je suchosť, predstavuje hodnotu 0,94 z obr. 10.2.

Príklad výpočtu uvádzam k ohrievaču číslo 06 z tab. 10.1.

Obr. 10.2 Diagram mokrej páry, [5]



Pre určenie priebehu expanzie v nízkotlakovom diele turbíny sa uvažuje jedno odlúčenie 3 % vlhkosti pri tlaku 37 kPa. Tým sa dosiahne to, že výstupná vlhkosť z turbíny neprevýši prípustnú hodnotu.

Vnútoraná termodynamická účinnosť časti pred odlúčením vlhkosti je

$$\eta_{NT1} = 0,853, \text{ príslušný spád } \Delta i_{N1} = 423 kJ.kg^{-1}.$$

U časti po odlúčení vlhkosti je

$$\eta_{NT2} = 0,813, \text{ príslušný spád } \Delta i_{N2} = 241 kJ.kg^{-1}$$

## 10.2 Výpočet ohrievania napájacej vody

Do chladiča kondenzátu predhrievača ide relatívne množstvo  $y_1 = 0,06$ . Predpokladá sa jeho zoškrtanie na tlak odpovedajúci teplote:

$t_{ch} = 231^\circ\text{C}$ , merná teplota odpovedajúca tlaku sýtosti kondenzujúcej pary v chladiči kondenzátu.

$i_{ch} = 995\text{kJ.kg}^{-1}$ , merná entalpia odpovedajúca tlaku sýtosti kondenzujúcej pary v chladiči kondenzátu.

### Chladič kondenzátu:

Z rovnice tepelnej bilancie si určíme  $i_{nv}$

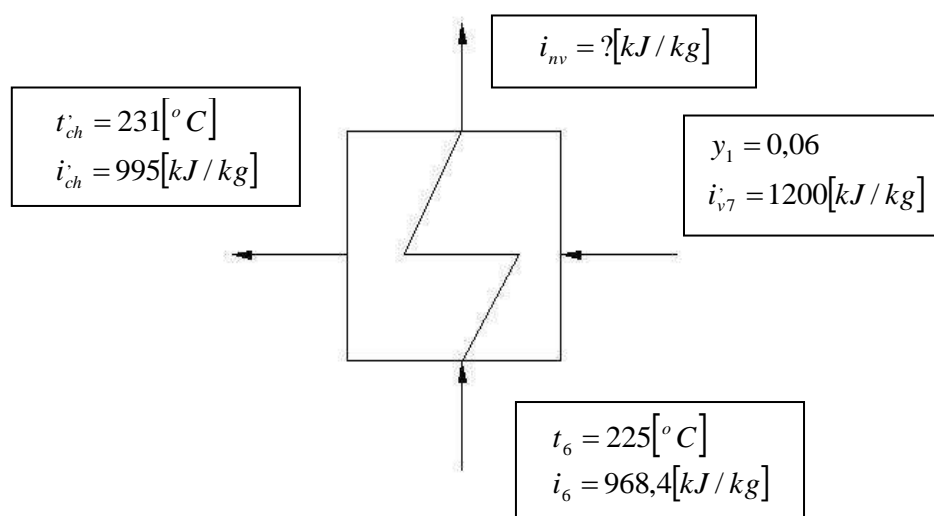
$$1,01(i_{nv} - i_6) = y_1(i_{v7} - i_{ch}) \quad (3)$$

$$1,01(i_{nv} - 968,4) = 0,06(1200 - 995) \Rightarrow i_{nv} = 980,6[\text{kJ.kg}^{-1}]$$

$i_{nv} = 980,6\text{kJ.kg}^{-1}$ , merná entalpia napájacej vody

$t_{nv} = 228^\circ\text{C}$ , teplota napájacej vody

Obr. 10.2.1 Chladič kondenzátu



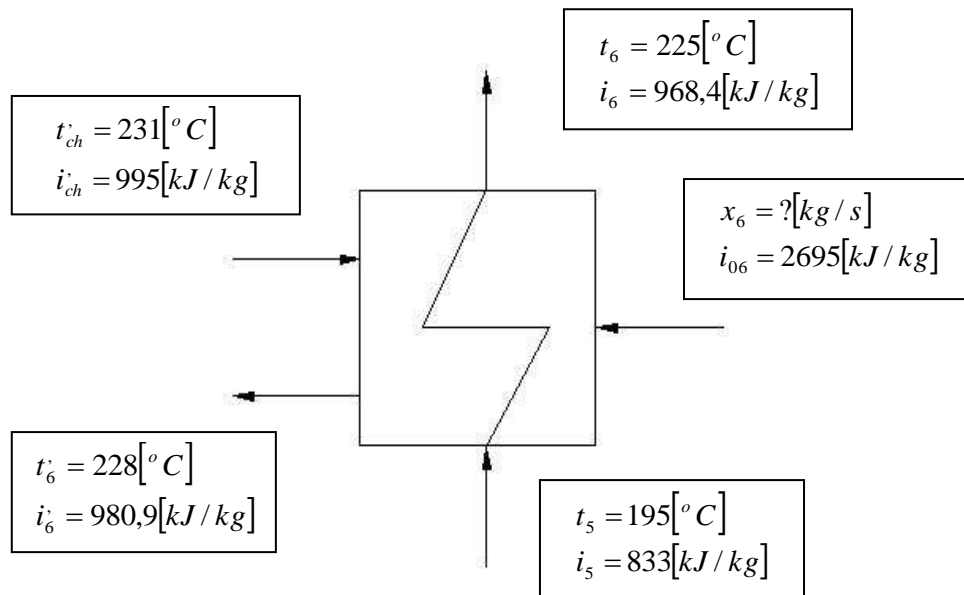
### Ohrievač 06:

$$1,01(i_6 - i_5) = x_6(i_{06} - i_6) + y_1(i_{ch} - i_6) \quad (4)$$

$$1,01(968,4 - 833) = x_6(2695 - 980,9) + 0,06(995 - 980,9) \Rightarrow x_6 = 0,0793 [kg.s^{-1}]$$

$x_6$  predstavuje relatívne množstvo odberovej páry v ohrievači 06.

Obr. 10.2.2 Ohrievač 06



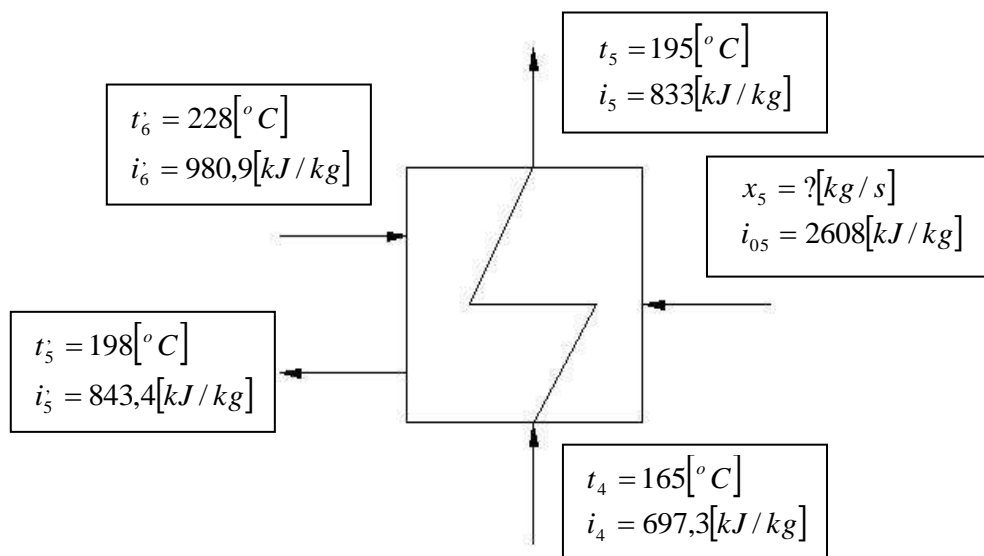
**Ohrievač 05:**

$$1,01(i_5 - i_4) = x_5(i_{05} - i_5) + (x_6 + y_1)(i_6 - i_5) \quad (5)$$

$$1,01(833 - 697,3) = x_5(2608 - 843,4) + (0,0793 + 0,06)(980,9 - 843,4) \Rightarrow x_5 = 0,066 [kg.s^{-1}]$$

$x_5$  predstavuje relatívne množstvo odberovej páry v ohrievači 05

Obr. 10.2.3 Ohrievač 05



**Ohrievač 04:**

$$[1,01 - (x_4 + x_5 + x_6 + y_1 + y_2)](i_3 - i_2) = x_4(i_{04} - i_4) + (x_5 + x_6 + y_1)(i_5 - i_4) \quad (6)$$

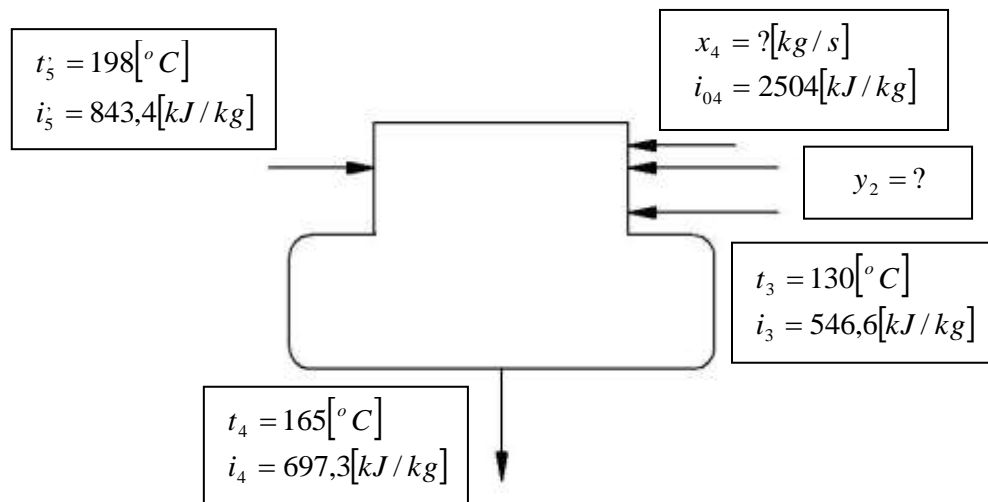
Kde  $y_2$  je množstvo odlúčenej vody za stredotlakovým dielom turbíny a pri odlúčení 12,5 % vlhkosti sa rovná :

$$y_2 = 0,125[1 - (x_4 + x_5 + x_6 + y_1)] \quad (7)$$

$$\{[1,01 - (x_4 + x_5 + x_6 + y_1 + 0,125[1 - (x_4 + x_5 + x_6 + y_1)])]\}(i_3 - i_2) = x_4(i_{04} - i_4) + (x_5 + x_6 + y_1)(i_5 - i_4)$$

$$\{[1,01 - (x_4 + 0,066 + 0,0793 + 0,06 + 0,125[1 - (x_4 + 0,066 + 0,0793 + 0,06)])]\}(546,6 - 419,6) = x_4(2504 - 697,3) + (0,066 + 0,0793 + 0,06)(843,4 - 697,3) \Rightarrow x_4 = 0,0352[kg.s^{-1}]$$

Obr. 10.2.4 Ohrievač 04



Rovnicu (7) som dosadil do rovnice (6) aby som mohol určiť relatívne množstvo odberovej pary pre ohrievač 04, následne som dopočítal relatívne množstvo kondenzátu  $y_2$

$$y_2 = 0,125[1 - (0,0352 + 0,066 + 0,0793 + 0,06)] \Rightarrow y_2 = 0,0949$$

**Ohrievač 03:**

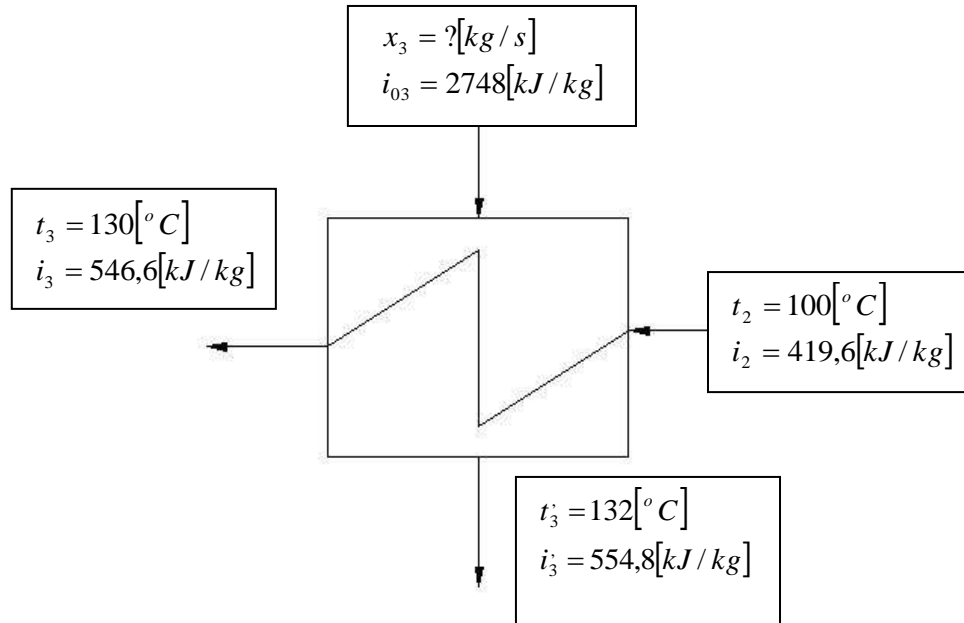
$$[1,01 - (x_4 + x_5 + x_6 + y_1 + y_2)](i_3 - i_2) = x_3(i_{03} - i_3) \quad (8)$$

$$[1,01 - (0,0352 + 0,066 + 0,0793 + 0,06 + 0,0949)](546,6 - 419,6) = x_3(2748 - 554,8)$$

$$x_3 = 0,0391[kg.s^{-1}]$$

$x_3$  predstavuje relatívne množstvo odberovej pary v ohrievači 03

Obr. 10.2.5 Ohrievač 03



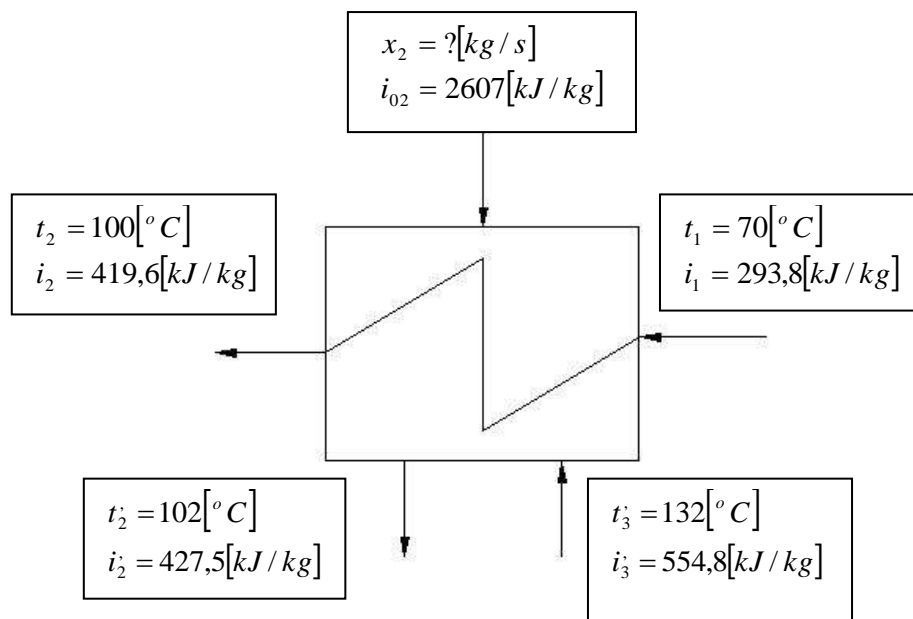
**Ohrievač 02:**

$$[1,01 - (x_4 + x_5 + x_6 + y_1 + y_2)](i_2 - i_1) = x_2(i_{02} - i_2) + x_3(i'_3 - i_2) \quad (9)$$

$$[1,01 - (0,0352 + 0,066 + 0,0793 + 0,06 + 0,0949)](419,6 - 293,8) = x_2(2607 - 419,6) + 0,0391(554,8 - 419,6) \Rightarrow x_2 = 0,0364 [kg \cdot s^{-1}]$$

$x_2$  predstavuje relatívne množstvo odberovej pary v ohrievači 02

Obr. 10.2.6 Ohrievač 02



### Ohrievač 01:

$$[1,01 - (x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + y_1 + y_2)](i_1 - i_0) = x_1(i_{01} - i_1) \quad (10)$$

$$[1,01 - (0,0364 + 0,0391 + 0,0352 + 0,066 + 0,0793 + 0,06 + 0,0949)](293,8 - 119,9) = x_1(2447 - 301,4) \Rightarrow x_1 = 0,0486 [kg \cdot s^{-1}]$$

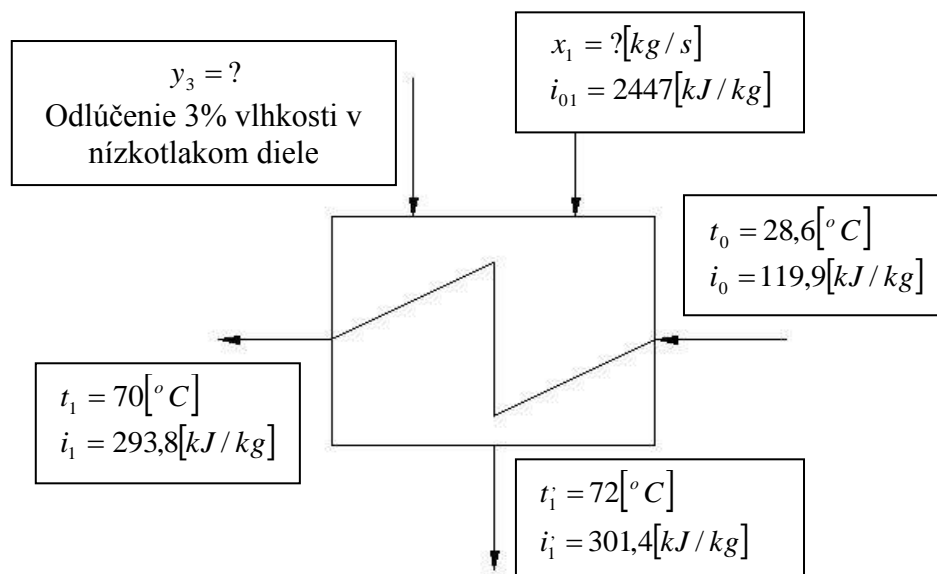
$x_1$  predstavuje relatívne množstvo odberovej páry v ohrievači 01

Odlúčenie 3 % vlhkosti v nízkotlakovom diele znamená relatívne množstvo

$$y_3 = 0,03[1 - (x_2 + x_3 + x_4 + x_5 + x_6 + y_1 + y_2)] \quad (11)$$

$$y_3 = 0,03[1 - (0,0364 + 0,0391 + 0,0352 + 0,066 + 0,0793 + 0,06 + 0,0949)] \Rightarrow y_3 = 0,0177$$

Obr. 10.2.7 Ohrievač 01



Pri výpočte ohrevania napájacej vody som vychádzal z tab. 10.1. Výsledky získané postupným riešením uvedených vzťahov a odčítaním spadov v  $i - s$  diagrame sú uvedené v tab. 10.2.

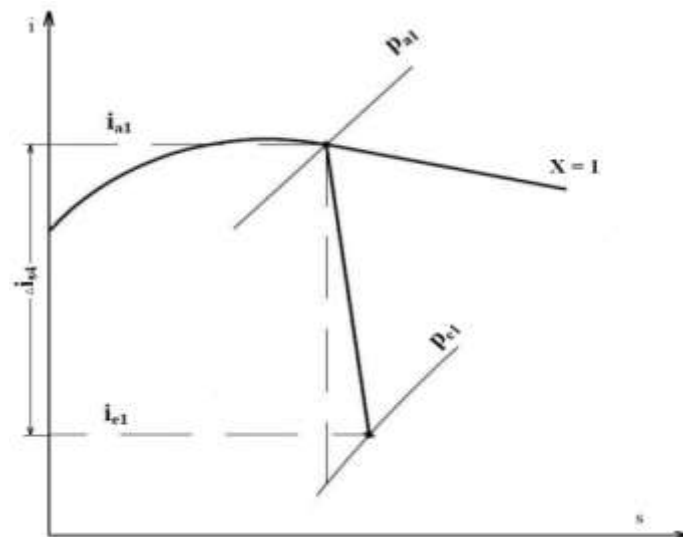
Tab.10.2 Výsledky výpočtov odberových množstiev pre ohrev napájacej vody

Veličina	Rozmer	Odber			
		x <sub>1</sub>	x <sub>2</sub>	x <sub>3</sub>	x <sub>4</sub>
Množstvo	$kg.s^{-1}$	0,0486	0,0364	0,0391	0,0352
Užitočný spád	$kJ.kg^{-1}$	703,5	543,5	402,5	280,5

Veličina	Rozmer	Odber				
		x <sub>5</sub>	x <sub>6</sub>	y <sub>1</sub>	y <sub>2</sub>	y <sub>3</sub>
Množstvo	$kg.s^{-1}$	0,0660	0,0713	0,060	0,0949	0,0177
Užitočný spád	$kJ.kg^{-1}$	176	89,5	0	280,5	704,5

Užitočný spád som prepočítaval nasledovne:

Obr. 10.4 Užitočný spád



$$\Delta i_{s4} = i_{a1} - i_{e1} = 2784,5 - 2504 = 280,5 [kJ.kg^{-1}] \quad (12)$$

Príklad výpočtu uvádzam pre odber x<sub>4</sub> z tab.10.2



### 10.3 Výpočet účinnosti navrhutej elektrárne

Účinnosť bude v tomto prípade závislá na:

- množstve vyrobenej pary
- výkone parnej turbíny
- vnútornej tepelnej účinnosti parného cyklu
- výkonu elektrárne na svorkách elektrického generátora
- tepelnej účinnosti parného obehu vzhľadom na svorky elektrického generátora
- čistom výkone elektrárne

#### Zadané:

Výkon parného generátora	$P_R = 3010$	[MW]
Výkon parnej turbíny	$P_T = 1015$	[MW]
Merná entalpia na vstupe 1 dielu turbíny	$i_{a1} = 2784,5$	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]
Merná entalpia napájacej vody	$i_{NV} = 980,6$	[kJ.kg <sup>-1</sup> ]
Relatívna vlastná spotreba elektrárne	$\varphi_{CV} = 0,05$	[-]
Mechanická a elektrická účinnosť turbogenerátora	$\eta_{me} = 0,983$	[-]

Ak neuvažujeme nad tepelnými stratami v elektrárni, tak množstvo páry vyrábané v parnom generátore je:

$$Q_{mp} = \frac{P_R}{i_{a1} - i_{NV}} = \frac{3010 \cdot 10^3}{2784,5 - 980,6} = 1668,6 [\text{kg.s}^{-1}] \quad (13)$$

Vnútorná tepelná účinnosť parného cyklu:

Obecne je vnútorná tepelná účinnosť parného obehu daná pomerom práce (alebo výkonu) parnej turbíny k množstvu tepla (alebo výkonu), predaného v parnom generátore pracovnej látke.

$$\eta_{ti} = \frac{P_T}{P_G} = \frac{1015}{3010} = 0,337 \quad (14)$$

Výkon elektrárne na svorkách elektrického generátora:

$$P_E = P_T \cdot \eta_{me} = 1015.0,983 = 997,75 [MW] \quad (15)$$

Tepelná účinnosť cyklu vzhľadom na svorky elektrického generátora:

$$\eta_{te} = \eta_{ti} \cdot \eta_{me} = 0,337.0,983 = 0,3313 \quad (16)$$

Čistý výkon elektrárne:

$$P_N = P_E \cdot (1 - \varphi_{cv}) = 997,5.0,95 = 947,63 [MW] \quad (17)$$

Čistá účinnosť:

$$\eta_N = \frac{P_N}{P_R} = \frac{947,63}{3010} = 0,315 \quad (18)$$

### 10.3.1 Možnosti zvyšovania účinnosti

Pri zvyšovaní čistej účinnosti jadrovej elektrárne je nutné znižovať tepelné, mechanické a elektrické straty zariadení, znižovať príkony potrebné pre cirkuláciu chladiva a pracovnej látky, predovšetkým zvyšovať vnútornú účinnosť parného obehu  $\eta_{ti}$ .

Na rozdiel od klasických tepelných elektrární, kde obmedzenie parametrov vyrobenej pary je dané vlastnosťami materiálu použitých pri výrobe ich zariadení, u jadrových elektrární sú parametre pary obmedzené palivom, jeho pokrytím a v niektorých prípadoch aj chladivom. Vo väčšine prípadoch sú zatiaľ u jadrových elektrární parametre pary nižšie.

Pre zvyšovanie tepelnej účinnosti parného obehu je možno u jadrových elektrární použiť okrem klasických spôsobov ohrievania kondenzátu a prihrievania pary ešte aj zníženie nevratnosti pri prenose tepla z chladiva do pracovnej látky v parnom generátore.

Pri ohrievaní kondenzátu odberovou parou sa v praxi používa maximálne 6 až 7 ohrievacích stupňov, pričom ohriatie napájacej vody v jednom ohrievači sa volí v rozmedzí 25 až 35 °C. Stanovenie optimálnej teploty napájacej vody a počtu regeneračných ohrievačov je zložitou technicko-ekonomickou otázkou.

Tieto hodnoty majú totiž vplyv na účinnosť celého parného obehu, parametre chladiva v okruhu reaktora, konštrukciu a investičné náklady parného generátora, reaktora, parnej turbíny a nakoniec aj systému ohrievania napájacej vody.

Prihrievanie pary má dva kladné vplyvy:

- zvýšenie tepelnej účinnosti parného obehu
- zníženie vlhkosti pary v koncových stupňoch turbíny a eventuálne prejsť na vyšší tlak vstupnej páry.

Veľkosť vonkajšej nevratnosti prenosu tepla vyjadruje energetická účinnosť parného generátora  $\eta_{pg}$ , ktorá sa definovať ako pomer práce odpovedajúceho Carnotovho cyklu pracovnej látky medzi teplotami  $T_s$  a  $T_2$  k práci odpovedajúceho Carnotovho cyklu chladiva medzi teplotami  $T_s^x$  a  $T_2$  (ide vlastne o maximálnu možnú prácu, ktorú by mohla pracovná látka vykonať).

$$\eta_{pg} = \frac{W}{W_x} = \frac{\frac{Q}{T_s}}{\frac{Q_x}{T_s^x}} = \frac{\eta_t}{\eta_{tx}} = \frac{1 - \frac{T_2}{T_s}}{1 - \frac{T_2}{T_s^x}} = \frac{(T_s - T_2)T_s^x}{(T_s^x - T_2)T_s} \quad (19)$$

kde

$W$  – práca Carnotovho cyklu pracovnej látky  $[J]$

$Q$  – teplo predané pracovnej látke v parnom generátore  $[J]$

$x$  – index, vzťahuje sa ku Carnotvmu cyklu chladiva

$T_s$  – stredná teplota pracovnej látky  $[K]$

$T_s^x$  - stredná teplota pracovnej látky, primajúca teplo v parnom generátore  $[K]$

Stupeň nevratnosti prenosu tepla v parnom generátore v podstate závisí na druhu použitého chladiva. Pri danej výstupnej teplote chladiva z reaktora (t. j. vstupná teplota do parného generátora) by bolo najpriaznivejšie minimálne ohriatie chladiva v reaktore. (t. j. ochladenie v parnom generátore). Táto požiadavka je splnená u kvapalných chladičov, predovšetkým u vody, vplyvom vysokej hodnoty merného tepla. Termodynamicky najvýhodnejšie je v tomto prípade použiť obeh so sýtou parou. Malé prehriatie páry by bolo možné uskutočniť len za cenu nižšieho tlaku páry a podstatného zvýšenia nevratnosti prenosu tepla v parnom generátore. [1]

## 11. Záver

Cieľom bakalárskej práce bolo priniesť ucelený prehľad o koncepcií jadrovej elektrárne tlakovodného typu, naznačiť ich vývoj, perspektívy, porovnanie. Druhá časť práce obsahuje náčrt primárneho a sekundárneho okruhu jadrovej elektrárne, ich konštrukčne časti, princíp činnosti následné ideové riešenie tepelného okruhu, ktorého cieľom bolo určenie jednotlivých parametrov sekundárneho okruhu elektrárne VVER 440.

Úvod uvádza stručný prehľad histórie tlakovodných reaktorov, nasleduje súčasný stav, princíp a bezpečnosť s výhľadom do budúcnosti, rozdelenie, následný vývoj jadrovej energetiky od generácie I. až po revolučné zmeny generácie IV. Ďalej je uvedený prierez jadrových elektrární tlakovodného typu od VVER 440 (čo v podstate tvorí reaktor, ktorý vychádzal z koncepcií overovaných na prvých prototypoch) až po SCWR, ktorý tvorí budúcnosť týchto jadrových reaktorov. Projektom SCWR sa zaoberá 32 organizácií z 13 zemí. Aj napriek technologickým nedostatkom sa tento projekt javí ako najlepší z ekonomického hľadiska, mnohoročných skúsenosti (podobnosť s dnešnými PWR reaktormi), účinnosti, „jednoduché“ konštrukcie. Podrobnejšie porovnanie vid'. kap. 7.

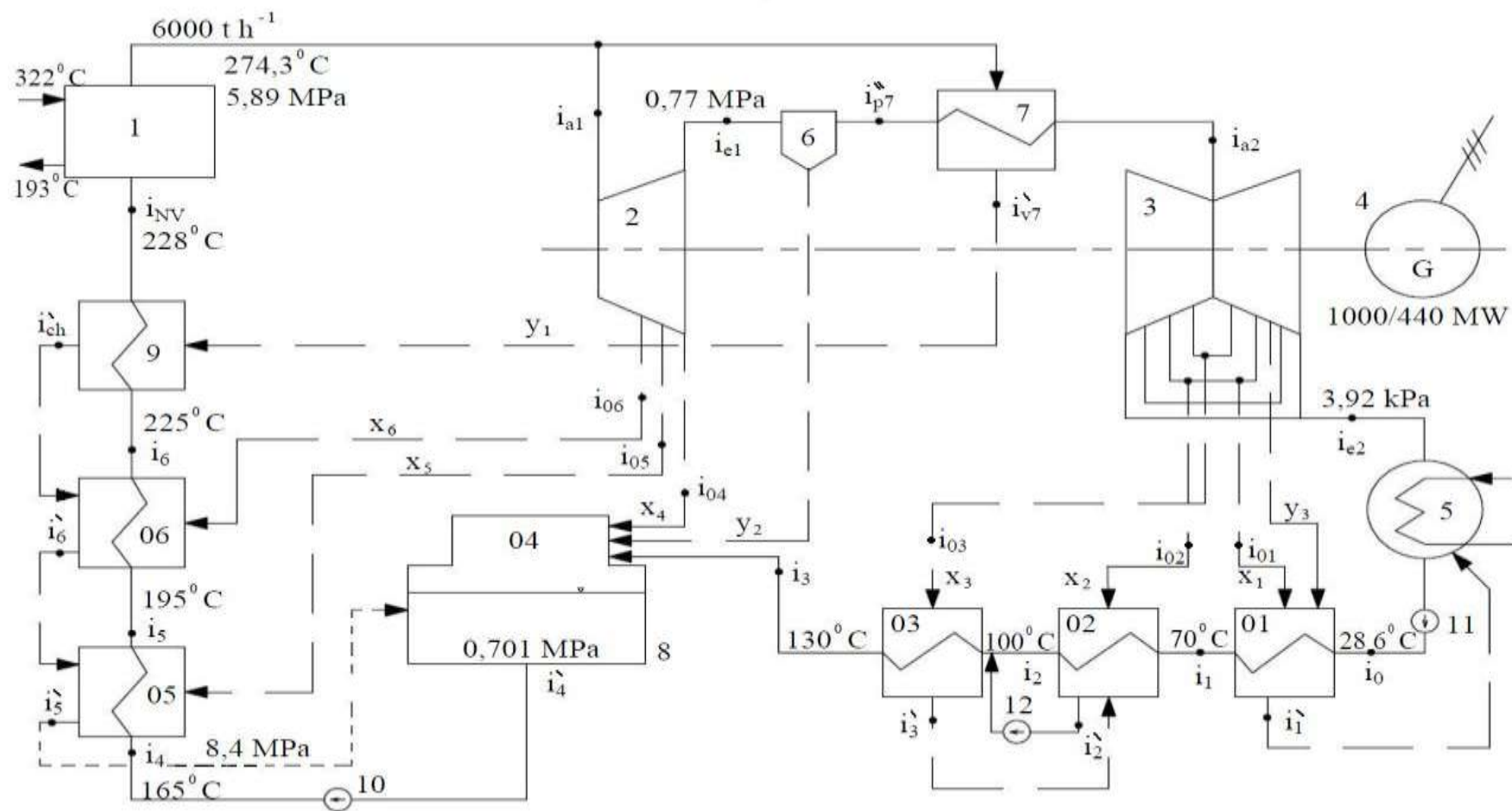
Druhá časť rozoberá primárny a sekundárny okruh jadrovej elektrárne, ich jednotlivé časti, princíp činnosti. V podstate tvorí úvod ideového riešenia tepelného okruhu, ktorý vychádza z prílohy A a B, ktorého cieľom je určenie jednotlivých parametrov sekundárneho okruhu elektrárne VVER 440. Od dielčích výpočtov, nameraných hodnôt, predpokladov podrobnejšie uvedených v kap. 10 nasleduje výpočet účinnosti navrhnutej elektrárne. Čistá účinnosť v tomto prípade činí 31,5%, závislosť tejto účinnosti bližšie v kap. 10.3. Ďalej je uvedený spôsob zvyšovania čistej účinnosti a tepelnej účinnosti parného obehu u jadrových elektrární.

## 12. Použitá literatura

- [1] BEČVÁŘ, Josef a kol. Jaderné elektrárny. 1. vyd. SNTL/ALFA Praha 1988. 634 s. Celostátní vysokoškolská učebnice
- [2] DUBŠEK, František. Jaderná energetika. 1. vyd. Brno: skripta Fakulty strojní VUT v Brně, PC-DIR spol. s r.o., 1994. 207 s. ISBN 80-214-0833-2
- [3] HEJZLAR, Radko. Stroje a zařízení jaderných elektráren díl 2. ČVUT Praha, 2005. ISBN 80-01-03189-6
- [4] HEŘMANSKÝ, Bedřich. Jaderná zařízení I. 2. vyd. ČVUT Praha 6, 1990. 185 s. ISBN 80-01-00405-8
- [5] KADLEC, Z. Termomechanika-návody do cvičení. 2.vyd. Ostrava: VŠB Ostrava 2008, 97 s.
- [6] Raček J.: Jaderné elektrárny. VUT v Brně, Brno 2002.
- [7] RAINER, S. Supercritical Water Reactors, Helsinki University of Technology, Otaniemi November 6. 2006 [cit. 2009-3.2]. Dostupné z WWW:  
< <http://www.tkk.fi/Units/AES/studies/dis/tulkki.pdf> >
- [8] VESECKÝ, R. Jaderné elektrárny s reaktory III. a IV. Generace. Praha, 2005.
- [9] < <http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/>>Reaktory IV. generace, Vladimír Wagner
- [10] <<http://proatom.luksoft.cz/>> Jaderné elektrárny- Typy reaktorů
- [11] <<http://www.cez.cz/>>Nová koncepce zdokonalených reaktorů
- [12] <<http://www.csvts.cz/>>Evropský tlakovodní reaktor (EPR)
- [13] <<http://www.allforpower.cz/>>Reaktor AP1000™ od Westinghouse zaručuje bezpečnost a přináší úspory
- [14] <<http://cs.wikipedia.org/wiki/>>VVER
- [15] <<http://www.javys.sk>>Technický popis JE V1
- [16] <<http://www.nei.org/>> Nuclear Energy Institute

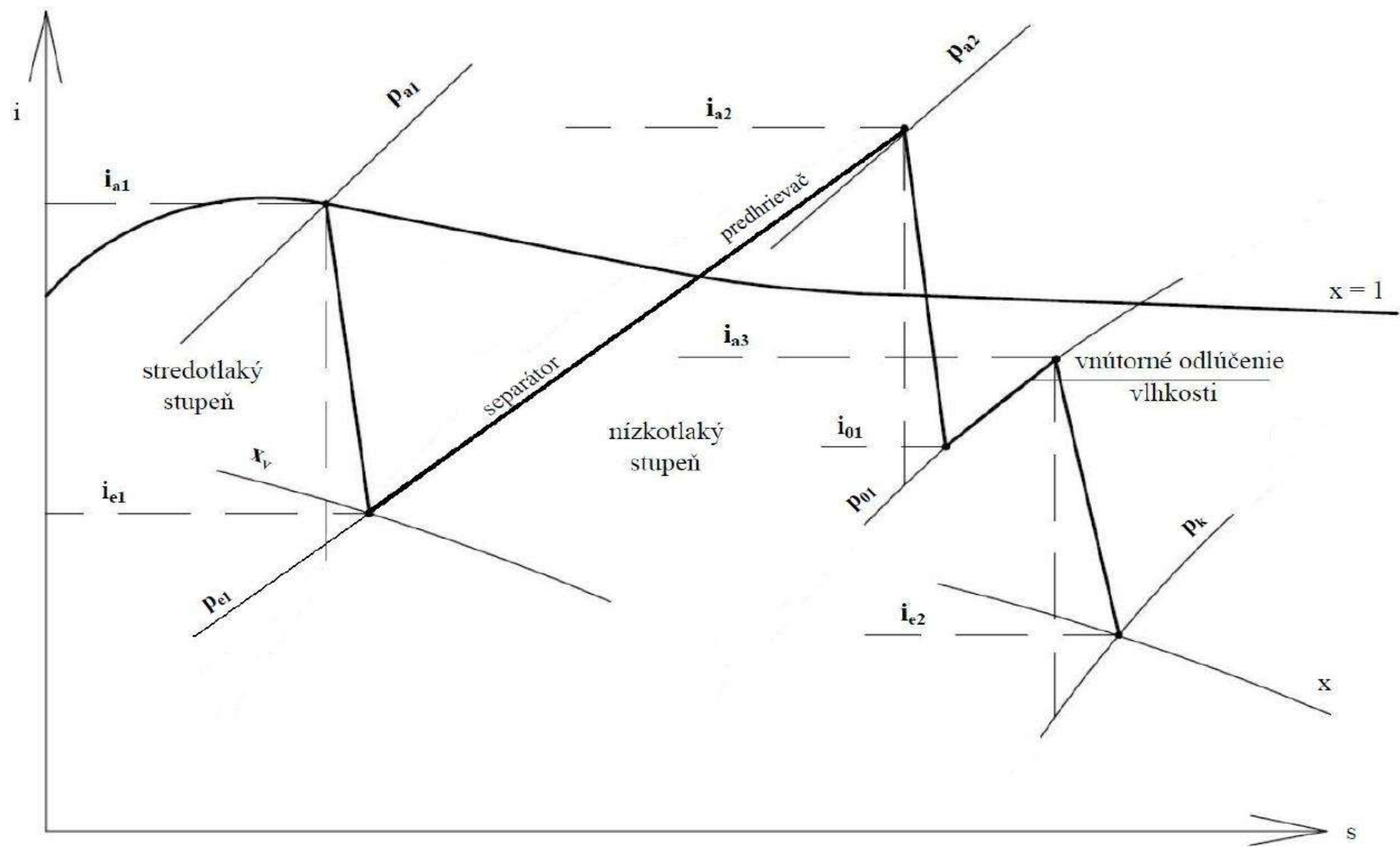
### **13. Prílohy**

- [A] Zjednodušené tepelné schéma sekundárneho okruhu elektrárne VVER 440
- [B] Priebeh expanzie v stredotlakovom a nízkotlakovom stupni parnej turbíny v diagrame  $i-s$ .



Príloha A: Zjednodušené tepelné schéma sekundárneho okruhu elektrárne VVER 440

- 1 – parogenerátor, 2 – stredotlaková časť PT, 3 – nízkotlaková časť PT, 4 – generátor, 5 – kondenzátor, 6 – odlučovač vlhkosti, 7 – predhrievač, 8 – odplyňovač, 9 – chladič kondenzátu, 10 – napájacie čerpadlo, 11 – kondenzačné čerpadlo, 12 – prečerpávacie čerpadlo  
01, 02, 03, 04, 05, 06 – ohrievače napájacej vody.



Príloha B: Priebeh expanzie v stredotlakovom a nízkotlakovom stupni parnej turbíny v diagrame  $i - s$ .